



*Centre of Expertise
Biobased Economy*



UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

Een testopstelling voor natuurlijk ademende gevels in ontwikkeling

Een onderzoek naar een optimale testopstelling voor het testen van biobased dampdiffusie open gevelconstructies op thermohygrische eigenschappen.

Bachelorscriptie
Versie 3

Een testopstelling voor natuurlijk ademende gevels in ontwikkeling

Een onderzoek naar een optimale testopstelling voor het testen van biobased dampdiffusie open gevelconstructies op thermohygrische eigenschappen.

Lectoraat

Naam	:	Centre of Expertise Biobased Economy, Lectoraat Biobased Bouwen
Begeleider	:	W.O.J. Böttger
Functie	:	Lector
Adres	:	Edisonweg 4
Postcode	:	4382 NW
Plaats:	:	Vlissingen
Tel.nr.	:	088-525 81 74
		06 – 52 34 50 20
Email	:	woj.bottger@avans.nl
Website	:	https://www.coebbe.nl/

Student

Naam	:	Y. Verhoeven
Adres	:	Titus Brandsmakwartier 2
		4333 EM Middelburg
Tel.	:	06 – 41 87 51 97
Email	:	verh0098@hz.nl
Studentnummer	:	66801
Cursuscode	:	CU13739, Bachelor scriptie

School

Naam	:	HZ University of Applied Sciences
SLC-Coach	:	W. de Jonge
Coördinator	:	C.C. Mabelis
Begeleidend docent	:	I.J.M. Weegels
1e examiner	:	I.J.M. Weegels
2e examiner	:	B.J. Vercouteren

Voorwoord

De scriptie 'Een testopstelling voor natuurlijk ademende gevels' dat u voor u heeft is het resultaat van mijn 5 maanden durende afstudeerperiode. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Lectoraat Biobased Bouwen van het Centre of Expertise Biobased Economy en is uitgevoerd in de periode van 30 januari 2017 tot en met 6 juni 2017.

Met een HAVO diploma ben ik begonnen aan de opleiding bouwkunde voltijd aan de Hogeschool Rotterdam. Deze opleiding heb ik één jaar gevolgd en daarbij heb ik mijn Propedeuse behaald. Vanwege persoonlijke omstandigheden heb ik deze opleiding niet vervolgd. Dit heeft geleidt tot een aantal jaren werk met als gevolg dat ik ben gaan reizen voor een langere periode. Teruggekomen van deze reis wilde ik alsnog een studie afmaken en daarbij voelde ik mijn interesse weer uitgaan naar de bouwsector. Hierom heb ik gekozen om de opleiding bouwkunde voltijd te vervolgen aan de HZ University of Applied Sciences.

Als student bouwkunde voltijd aan de HZ University of Applied Sciences heb ik mij gedurende de opleiding voornamelijk verdiept in de architectuur, omdat mijn interesse hier op voorhand naar uit ging. Het laatste jaar van deze opleiding ben ik mijzelf ervan bewust geworden dat mijn interesse naar bouwtechniek en bouwfysica net zo groot is. Echter in mijn zoektocht naar een afstudeerplek ben ik alsnog gaan kijken naar een bedrijf binnen de architectuurbranche. Uiteindelijk is het gunstig geweest dat hier geen positieve reactie op is gekomen. Dit heeft geleid naar een alternatief afstudeeraanbod dat is geleverd door docent mevr. Weegels die tevens mijn afstudeerdocent is geweest gedurende mijn afstudeerperiode.

Binnen de bouwsector ben ik altijd erg geïnteresseerd geweest naar duurzaam bouwen, omdat ik van mening ben dat we goed moeten zorgen voor ons enige leefgebied. Hierbij wil ik mevr. Weegels bedanken voor het aanbod om dit onderzoek te mogen uitvoeren. Tevens wil ik haar bedanken voor het begeleiden van mijn afstudeeronderzoek en het eigen maken van vaardigheden met betrekking tot efficiënt organiseren. Ik wil dhr. Böttger bedanken voor het mogelijk maken van deze afstudeerscriptie en voor de betrokkenheid binnen het lectoraat Biobased Bouwen. Ook bedank ik dhr. Kuindersma voor zijn interesse, moeite en behulpzaamheid waardoor dit onderzoek een duwtje in de juiste richting gekregen heeft. Tot slot wil ik mijn vriendin bedanken voor de positieve motivatie en dat ze rekening heeft gehouden met mij als ik het druk had en mijn humeur niet top was. Daarbij hebben de overheerlijke maaltijden aan het einde van de werkdag mij veel goeds gedaan.

Ik wens u veel plezier met het lezen van dit rapport.

Yoni Verhoeven

Middelburg, 5 juni 2017

Samenvatting

Het Lectoraat Biobased Bouwen houdt zich onder andere bezig met het ontwikkelen van biobased producten die vaak een vochtregulerend vermogen hebben, die toegepast kunnen worden in een dampdiffusie open systeem. Zij hebben het initiatief genomen om een onderzoek te starten naar hoe een dampdiffusie open gevelconstructie getest kan worden. Het doel is een antwoord te vinden op de vraag: *'Waar dient een testopstelling aan te voldoen om dampdiffusie open gevelconstructies te kunnen testen?'*

Dampdiffusie houdt in de waterdamp die zich in de lucht begeeft, zich door gevelconstructies kan verplaatsen als gevolg van een verschil in de dampspanning. Hiervoor dient de dampdiffusieweerstand van de samengestelde materialen in een gevel laag te zijn. In de praktijk wordt de gevel zodanig opgebouwd dat de dampdiffusieweerstand aan de binnenzijde van de gevel groter is dan aan de buitenzijde, omdat waterdamp zich hierdoor naar buiten verplaatst. Het principe bij dampdiffusie open bouwen is dat op jaarbasis (een cyclus van seizoenen) er geen vochtophoping mag voorkomen en dat een gevelconstructie het binnengekomen vocht in deze cyclus weer kan afgeven. Indien dit niet gebeurt betekent dit dat op lange termijn het vocht ophoopt en dit voor gevelschade kan zorgen. Het is cruciaal dat waterdamp zich door de materialen verplaatst en daarbij zijn luchtlekken funest. Vocht kan zich hierdoor zonder weerstand verplaatsen en dit kan zorgen voor inwendige condensatie, wat tevens op lange termijn weer kan leiden tot gevelschade. Het verschil in dampspanning is onder andere afhankelijk van de temperatuur en de luchtvochtigheid, waardoor het heersende klimaat een grote rol speelt bij de dampdiffusie.

Het klimaat is op elke locatie anders en in het kader van dit onderzoek is er uitsluitend uitgegaan van een Nederlands klimaat, waarbij er temperaturen van -15°C tot en met 40°C en relatieve vochtigheden van 10% tot en met 95% zijn aangehouden. Het binnenklimaat is afhankelijk van de functie die zich in een bouwwerk begeeft en dit kan op verschillende manieren bepaald worden. De Adaptieve Temperatuur Grenswaarden (ATG) methode is meest geavanceerde methode, omdat deze de temperatuur binnen aanpast aan de temperatuur die buiten heerst. Deze methode is ontwikkeld door praktijkonderzoek te doen en gebruik te maken van de Fanger methode die vooral gebaseerd is op laboratorium onderzoek.

Zoals eerder genoemd heeft de dampdiffusieweerstand een bepalende rol bij dampdiffusie open bouwen. Echter is het niet zo dat er een testopstelling wordt ontwikkeld waarbij de dampdiffusie-weerstand wordt gemeten. De dampdiffusieweerstand dient apart te worden getest in een testopstelling die staat omschreven in de NEN-EN-ISO 12572 (bekermethode) en NEN-ISO 21129 (boxmethode).

Om het klimaat binnen de testopstelling te kunnen regelen dienen er sensoren en apparatuur te worden toegepast. De mogelijkheden zijn in beeld gebracht, maar dit is niet nader onderzocht vanwege beperkte deskundigheid en tijd. Het is aanbevolen om dit door een deskundige nader te laten onderzoeken. Wel is er een studie gedaan naar de mogelijkheid om het vochttransport in het testmonster (gevel) te monitoren. Hiervoor zijn dusdanig kleine hygrosensoren nodig. Deze zijn beschikbaar en hebben volgens Derome, Fazio, Anthientis, & Rao de capaciteit om vocht in een isolatiemateriaal te meten.

De testopstelling dient te bestaan uit twee klimaatkamers die gekoppeld kunnen worden. Dit principe lijkt erg op een Calibrated Hot Box methode die normaliter gebruikt wordt om thermische prestaties van samengestelde gevelconstructies te meten. Echter bij dampdiffusie open bouwen is het gewenst het vochttransport te monitoren en daarom dienen er enige aanpassingen te worden gedaan. De testopstelling dient afgewerkt te worden met roestvaststaal dat voor de dampdichtheid zorgt en bestand is tegen corrosie. De aansluitingen dienen luchtdicht en koudebrugvrij te zijn. De testopstelling dient los te staan van de grond om warmteoverdracht met de ondergrond te minimaliseren en tevens dient de testopstelling inloopbaar te zijn in verband met controle van de aansluitingen van het testmonster en sensoren. Door de juiste aanpassingen te maken aan de Calibrated Hot Box kan de dampdiffusie door een samengestelde gevelconstructie ook hierin worden getest. Het is hierbij wel van belang van te voren te bepalen welke parameters er getest dienen te worden.

Figuren- & tabellenlijst

FIGUUR 1: SCHEMA DOELSTELLING	2
FIGUUR 2: SCHEMA PLAN VAN AANPAK.....	3
FIGUUR 3: ORGANOGRAM COEBBE (CONTACTPERSONEN).....	10
FIGUUR 4: BEPALING VAN HET GEBOUW/KLIMAATTYPE VAN EEN GEBOUW OF RUIMTE, AFHANKELIJK VAN DE ADAPTATIEMOGELIJKHEDEN. BRON DATA; (VAN BEEK, 2006).....	16
FIGUUR 5: GEBOUW/KLIMAATTYPE ALPHA. MAXIMAAL TOELAATBARE OPERATIEVE BINNENTEMPERatuur VOOR EEN BEPAALDE ACCEPTATIE, AFHANKELIJK VAN DE BUITENTEMPERatuur $T_{e,ref}$. DATA BRON ADAPTIEVE TEMPERatuurGRENSWAARDEN (ATG), ISSO 74 (BEEK, 2006).....	17
FIGUUR 6: GEBOUW/KLIMAATTYPE BËTA. MAXIMAAL TOELAATBARE OPERATIEVE BINNENTEMPERatuur VOOR EEN BEPAALDE ACCEPTATIE AFHANKELIJK VAN DE BUITENTEMPERatuur $T_{e,ref}$. DATA BRON ADAPTIEVE TEMPERatuurGRENSWAARDEN (ATG), ISSO 74 (BEEK, 2006).....	17
FIGUUR 7: RELATIE LUCHTTEMPERatuur EN LUCHTVOCHTIGHEID, BRON DATA; (DE ROTTE, 1992).....	18
FIGUUR 8: TYPEN SENSOREN	25
FIGUUR 9: POLYMERISCHE HYGRO SENSOREN, BRON DATA; (JAIN, 2012).	25
FIGUUR 10: SENSORGEBIED N.A.V. RANDEFFECTEN IN DWARSDOORSNEDE SCHETSCONCEPT TESTOPSTELLING.	26
FIGUUR 11: VERWARMINGS- EN KOELINGSMETHODEN	27
FIGUUR 12: HET SCHEMATISCH PRINCIPE VAN APPARATUUR AANSLUITING IN DE TESTOPSTELLING.	28
FIGUUR 13: SCHETSONTWERP.....	31
FIGUUR 14: SCHEMATISCHE OPBOUW GUARDED HOT BOX METHODE VOLGENS C1363 (ASTM STANDARDS, 1997).....	32
FIGUUR 15: SCHEMATISCHE OPBOUW CALIBRATED HOT BOX METHODE VOLGENS C1363 (ASTM STANDARDS, 1997).	32
FIGUUR 16: SCHEMATISCHE OPBOUW VAN 'BETAALBARE' CALIBRATED HOT BOX, BRON DATA; (SEITZ & MACDOUGALL).	33
 TABEL 1: RESPONDENT(EN) SCHEMA.....	5
TABEL 2: OVERZICHT EENHEDEN	6
TABEL 3: RICHTLIJNEN ETHISCHE VERANTWOORDING	6
TABEL 4: RISICO'S & OPLOSSINGEN.....	7
TABEL 5: AFBAKENING ONDERZOEKSVRAGEN	8
TABEL 6: KOSTENPOSTEN.....	9
TABEL 7: MAANDGEMIDDELDE TEMPERATUREN N.A.V. JAAROVERZICHTEN, BRON DATA; KNMI	14
TABEL 8: GEMIDDELDE DAMPDruk PER MAAND IN NEDERLAND, TOTAAL AANTAL WEERSTATIONS, KLIMAATATLAS 1981-2010	14
TABEL 9: GEMIDDELDE RELATIEVE VOCHTIGHEID PER MAAND IN NEDERLAND, TOTAAL AANTAL WEERSTATIONS, KLIMAATATLAS 1981-2010	14
TABEL 10: BINNENKLIMAATKLASSEN IN NEDERLAND.....	15
TABEL 11: EXTERNE SIMULATIE M.B.V. MAANDGEMIDDELDEN IN NEDERLAND, BRON DATA; KNMI.....	18
TABEL 12: MAANDGEMIDDELDE BINNENTEMPERATUREN EN RELATIEVE VOCHTIGHEDEN IN ALPHA GEBOUWEN.	19
TABEL 13: MAANDGEMIDDELDE BINNENTEMPERATUREN EN RELATIEVE VOCHTIGHEDEN IN BËTA GEBOUWEN.....	19
TABEL 14: EENHEDEN TEMPERatuur.....	20
TABEL 15: NORMEN IN HET KADER VAN WATERDAMPDOORLATENDHEID PER MATERIAAL.	23
TABEL 16: NORMEN MET BETREKKING TOT HET VASTSTELLEN VAN HET KLIMAAT.	23
TABEL 17: LOCATIES SENSOREN	24
TABEL 18: PARAMETERS BIJ DE VERSCHILLENDE TYPEN ABSOLUTE VOCHTIGHEID SENSOREN; BRON DATA (JAIN, 2012).....	26

Afkortingen- & begrippenlijst en eenheden

ASTM	American Society for Testing and Materials. Een norm die geldig is in de Verenigde Staten.
ATG	Adaptieve Temperatuur Grenswaarden
CoEBBE	Centre of Expertise Biobased Economy
HSB	Houtskeletbouw
P.v.E.	Programma van Eisen
NEN	Koninklijke Nederlandse Normalisatie-instituut
NEN-EN	Europese Norm
NEN-EN-ISO	International Organization for Standardization (norm)
GTO	Gewogen Temperatuur Overschrijding
RVS	Roestvaststaal
WUFI	Wärme Und Feuchte Instationär
Accrediteren	<i>"Een officiële stempel van goedkeuring aan iets." - (WikiWoordenboek).</i>
Adiabatisch	<i>"Een adiabatisch proces, is een proces waarbij geen uitwisseling van warmte met de omgeving plaats vindt." - (Uges)</i>
Afbakening	Aangeven waar de grenzen liggen wat er niet binnen (de activiteiten/onderzoek) valt en wat er dus niet (en tevens wel) uitgevoerd wordt.
Behaaglijk	Iets waar je je aangenaam bij voelt.
Biobased	<i>"Biobased materiaal is hernieuwbaar materiaal van biologische oorsprong, exclusief materiaal uit geologische afzettingen of gefossiliseerd materiaal." - (Bruggink, 2017)</i>
(Bio)composiet	Composieten zijn materialen die uit meerdere componenten bestaan. Deze zijn samengevoegd om vaak een sterker product te ontwikkelen. Biocomposieten zijn dus composieten die gemaakt zijn uit plantaardige vezels.
Bouwbesluit	<i>"Een bouwbesluit is een Algemene Maatregel van Bestuur (AMvB), met daarin de minimale technische eisen waaraan alle bouwwerken (zowel nieuwbouw als bestaande bouwwerken) aan moeten voldoen in Nederland." - (Redactie Ensie, 2017)</i>
Bouwfysisch	(Bouwfysica) – <i>"Wetenschap die zich bezighoudt met warmte en massatransport, bouwakoestiek en lichttechniek van gebouwen." - (Trinivast Beheer B.V., sd), (Tecum, sd)</i>
Composiet	Samengesteld product/materiaal.
Dampdicht bouwen	De schil (gevels) van een bouwwerk uitvoeren in materialen waarvan de totale dampdiffusieweerstand hoog is of een dampdicht laag toepassen.
Dampdiffusie (weerstand)	De verplaatsing van vocht in gasvorm door constructieve en bouwkundige elementen zoals gevels, daken en andere materialen. De dampdiffusieweerstand is de weerstand die een materiaal biedt om daarmee een het vochttransport vertraagt.
Dampopen	Wanneer de dampdiffusieweerstand zodanig laag is dat vocht (damp) zich relatief gemakkelijk door het materiaal kan verplaatsen.
Data	Informatie en/of gegevens.

Deskresearch	Verwerven van feitelijke en praktische informatie. Vaak in de vorm van primaire gegevens (Poortinga).
Ethisch	"Als iets verband houdt met normen over wat goed en slecht is" - (Kernerman Dictionaries, sd)
Funest	'Heel schadelijk'
Geluidsabsorptie	Geluidsgolven komen in aanraking met materialen waarbij zij de materialen 'vervormen'. Deze vervorming kost energie, waarbij warmte wordt geproduceerd die vervolgens door het materiaal wordt opgenomen.
Klimaat	Een gemiddelde weertoestand over een periode van minimaal 30 jaar.
Klimaatkamer	Een ruimte waar een bepaald klimaat in kan worden gesimuleerd.
Klimatologie	"De leer van lucht- en weersgesteldheid" - (WikiWoordenboek).
Koudebrug	Een onderbreking van de isolatielaag waarbij warmte gemakkelijk overgedragen als gevolg van lage warmteweerstand. Dit kan leiden tot warmte verlies.
Literatuurstudie	Verwerven van wetenschappelijke theoretische informatie in de vorm van onderzoeksconclusies (Poortinga).
Luchtdicht bouwen	De schil (gevels) van een bouwwerk zodanig bouwen dat er geen luchtlekken of kieren aanwezig zijn, waar lucht zich zonder weerstand doorheen kan verplaatsen.
Monitoren	Iets kritisch volgen. Bijvoorbeeld de waarnemingen afkomstig uit de sensoren kritisch volgen.
Normen (bouw)	"Een norm of standaard is een document met erkende afspraken, specificaties of criteria over een product, een dienst of een methode." - (Wikipedia, 2017)
Populatie	Totale groep of resultaten waarop een onderzoek zich richt.
Prototypen	"Een eerste exemplaar van een nieuwe product" - (WikiWoordenboek).
Randvoorwaarden	Eisen waaraan voldoen moet zijn om een project te kunnen starten of afronden.
Respondent	Iemand die antwoordt geeft op een interview/enquête.
Schetsconcept	Een ontwerp dat een indicatie geeft van hoe het eindproduct eruit dient te zien. Het gaat hierbij voornamelijk om de eisen en randvoorwaarden waaraan dient te voldoen.
Sensoren	Apparatuur die bepaalde bepaalde waarden kunnen waarnemen; Thermosensor waarneemt de temperatuur Hygrosensoren waarneemt het vochtgehalte
Simulatie	De omgeving of iets nabootsen.
Testmonster	Het element in de vorm van een (samengesteld) gevel dat getest kan worden in de testopstelling.
Thermisch	Dit heeft betrekking tot warmte.
Thermohygrisch	Het gedrag en de relatie van warmteoverdracht en vochttransport.
Transcript	Een letterlijk uitgeschreven tekst van gesproken taal.
Veldonderzoek	Onderzoek waarbij de praktijk wordt benaderd en geobserveerd.
Vochtgehalte	De hoeveelheid vocht die zich in de lucht of materiaal begeeft.
Vochtregulerend vermogen	De eigenschap hebben om als materiaal vocht te kunnen opnemen, vasthouden en weer afstaan op gunstige momenten.
Warmteoverdracht	"Is de flux (stroming) van energie in de vorm van warmte van locaties met een hogere naar locaties met een lagere temperatuur." - (WikiWoordenboek)

Inhoudsopgave

1.	INLEIDING	1
2.	PROBLEEM- EN DOELSTELLING	2
2.1.	HOOFDVRAAG.....	2
2.2.	DEELVRAGEN.....	2
2.3.	OP TE LEVEREN (TUSSEN)PRODUCTEN	3
3.	ONDERZOEKSMETHODIEK.....	4
3.1.	KWALITATIEVE DATAVERWERKING.....	5
3.2.	POPULATIE.....	5
3.2.1.	<i>Eenheden</i>	6
3.2.2.	<i>Steekproef</i>	6
3.3.	ETHISCHE VERANTWOORDING	6
3.4.	RISICO'S	7
3.4.1.	<i>Afbakening</i>	7
3.4.2.	<i>Referentie onderzoek</i>	8
3.5.	KOSTEN.....	9
4.	THEORETISCH KADER	9
4.1.	CENTRE OF EXPERTISE BIOBASED ECONOMY, LECTORAAT BIOBASED BOUWEN	9
4.2.	DAMPDIFFUSIE OPEN BOUWEN	10
4.3.	VOCHTIGE LUCHT.....	10
4.4.	VENTILEREN EN ENERGIEBESPARING	11
4.5.	THERMOHYGRISCHE EIGENSCHAPPEN	11
4.6.	WET & REGELGEVING EN NORMEN	11
5.	RESULTATEN.....	12
5.1.	DAMPDIFFUSIE OPEN BOUWEN	12
5.2.	KLIMATOLOGIE IN NEDERLAND.....	13
5.2.1.	<i>Wind en zonlicht</i>	14
5.2.2.	<i>De invloed van dag en nacht</i>	15
5.2.3.	<i>Binnenklimaat</i>	15
5.3.	KLIMAATSIMULATIE	18
5.3.1.	<i>Nulpunt</i>	18
5.3.2.	<i>Externe simulatie</i>	18
5.3.3.	<i>Interne simulatie</i>	18
5.3.4.	<i>Extreem klimaat simulatie</i>	19
5.4.	THERMOHYGRISCHE EIGENSCHAPPEN	19
5.4.1.	<i>Droge bol en natte bol temperatuur</i>	20
5.4.2.	<i>Dampspanning</i>	20

5.4.3.	<i>Absolute vochtigheid</i>	21
5.4.4.	<i>Relatieve vochtigheid</i>	21
5.4.5.	<i>Dauwpunt</i>	21
5.4.6.	<i>Inwendige condensatie</i>	21
5.4.7.	<i>Het Mollierdiagram</i>	21
5.4.8.	<i>Dampdiffusie(weerstand)</i>	22
5.5.	SOFTWARE	22
5.6.	WET- EN REGELGEVING	22
5.6.1.	<i>Bouwbesluit</i>	22
5.6.2.	<i>Koninklijke Nederlandse Normalisatie-instituut</i>	22
5.7.	VERGELIJBARE MEETMETHODEN	24
5.8.	MEETAPPARATUUR	24
5.8.1.	<i>Thermosensoren</i>	24
5.8.2.	<i>Hyrgosensoren</i>	25
5.8.3.	<i>Randeffecten</i>	26
5.9.	KLIMAATREGELING	27
5.9.1.	<i>Verwarmings- en koelingsapparatuur</i>	27
5.9.2.	<i>Bevochtigings en ontvochtigingsapparatuur</i>	27
5.9.3.	<i>Apparatuur aansluiting</i>	28
5.9.4.	<i>Het Molliediagram in praktijk</i>	29
5.10.	PARAMETERS	30
5.11.	RANDVOOWAARDEN TESTOPSTELLING	30
5.12.	HOT BOX METHODE	31
5.13.	EEN BETAALBARE HOT BOX TESTOPSTELLING	33
6.	CONCLUSIES	34
7.	DISCUSSIE EN AANBEVELINGEN	38
8.	LITERATUURLIJST	40
Bijlage I.	Deelrapport: Dampdiffusie open bouwen	
Bijlage II.	Deelrapport: Thermohygrische eigenschappen	
Bijlage III.	Deelrapport: Wet- en regelgeving	
Bijlage IV.	Deelrapport: Meetmethodes en (meet)apparatuur	
Bijlage V.	Deelrapport: Opbouw testopstelling	

1. Inleiding

Duurzaamheid is anno 2016 een belangrijk begrip in de bouwsector. Onder andere in Nederland is men in de loop van de jaren zich er bewust van geworden dat bepaalde materialen in de bouw belastend zijn voor het milieu. Biobased bouwmaterialen zijn zodanig geproduceerd dat deze een lage CO₂ footprint hebben en weinig tot niet milieubelastend zijn. Naast de lage milieubelasting staan biobased bouwmaterialen er ook om bekend dat deze een vochtregulerend vermogen hebben, wat in een dampdiffusie open systeem kan worden toegepast. Hiermee kan het vocht in de gevelconstructies worden afgevoerd waarbij condens en schimmelvorming kan worden voorkomen. Dit heeft voordelen voor de levensduur van de constructie.

In samenwerking met het Centre of Expertise Biobased Economy (COEBBE), lectoraat Biobased Bouwen is er een onderzoek gestart waarbij er een testopstelling wordt ontworpen waarin dampdiffusie open constructies kunnen worden getest. Het CoEBBE is een samenwerking tussen het Avans en de HZ en bevat drie lectoraten waarvan Biobased Bouwen er één van is.

Momenteel ontwikkelt het Centre of Expertise Biobased Economy producten die een toegevoegde waarde hebben op het maatschappelijk draagvlak. Deze producten zijn in ontwikkeling en zijn slecht bekend op de markt. Om deze materialen een sterkere achtergrond te geven met betrekking tot het presenteren van de materialen, dienen deze getest te worden. Het testen van de producten heeft ook voordelen voor het door ontwikkelen van de producten. Deze testen worden niet altijd door het Centre of Expertise Biobased Economy uitgevoerd vanwege gebrek aan kennis, materieel en/of apparatuur.

Dit onderzoek leidt naar een schetsontwerp voor een testopstelling voor het uitvoeren van testen op dampdiffusie open gevelconstructies. Daarbij is een studie gedaan naar wat dampdiffusie open bouwen inhoudt, omdat voor het lectoraat Biobased Bouwen dit onderwerp nog wat onbekendheden bevat. Als gevolg hiervan is onderzocht wat voor opstelling van toepassing is om dampdiffusie open gevelconstructies te kunnen testen op de juiste thermohygrische eigenschappen. In Nederland is het principe van dampdiffusie open bouwen minder bekend dan in Duitsland of Canada. Dit onderzoek geeft een inzicht in hoeverre deze informatie in Nederland beschikbaar is, en is een toevoeging om een duidelijker beeld te schetsen van hoe dampdiffusie open bouwen werkt. De testopstelling is zodanig benaderd en ontworpen dat het lectoraat in staat moet zijn producten en samengestelde gevelconstructies te testen die in de toekomst worden ontwikkeld. Op deze wijze zal het lectoraat Biobased Bouwen in staat zijn elk product te kunnen testen op het dampdoorlatendheid en het dampdiffusie open zijn.

2. Probleem- en doelstelling

Het lectoraat Biobased Bouwen is bezig om samen met onderwijs, ondernemers en overheid op zoek te gaan naar een toegevoegde waarde van biobased toepassingen voor gebruikers. Tevens houdt het lectoraat zich bezig met het onderzoeken en ontwikkelen van biobased producten die een toegevoegde waarde hebben voor het maatschappelijke draagvlak. Biobased materialen staan erom bekend dat zij een vochtregulerend vermogen hebben die daarom wordt toegepast in dampdiffusie open gevelconstructies. Deze producten worden daarom doorontwikkeld of toegepast voor praktische doeleinden. Echter zijn de eigenschappen van deze producten nog niet altijd bekend en dienen hiervoor testen uitgevoerd te worden om dit in beeld te brengen. Deze testen kunnen uitbesteed worden, maar het lectoraat Biobased Bouwen wilt deze mogelijkheid graag intern hebben. Figuur 1 geeft een huidig globaal proces weer van het ontwikkelen tot aan testen van een biobased product. Het probleem zit hem in het feit dat er geen mogelijkheid is om zelf testen uit te voeren. De doelstelling is om een testopstelling te ontwerpen waarmee dampdiffusie open gevelconstructies getest kunnen worden op het aspect van dampdiffusie open bouwen.



Figuur 1: Schema doelstelling

2.1. Hoofdvraag

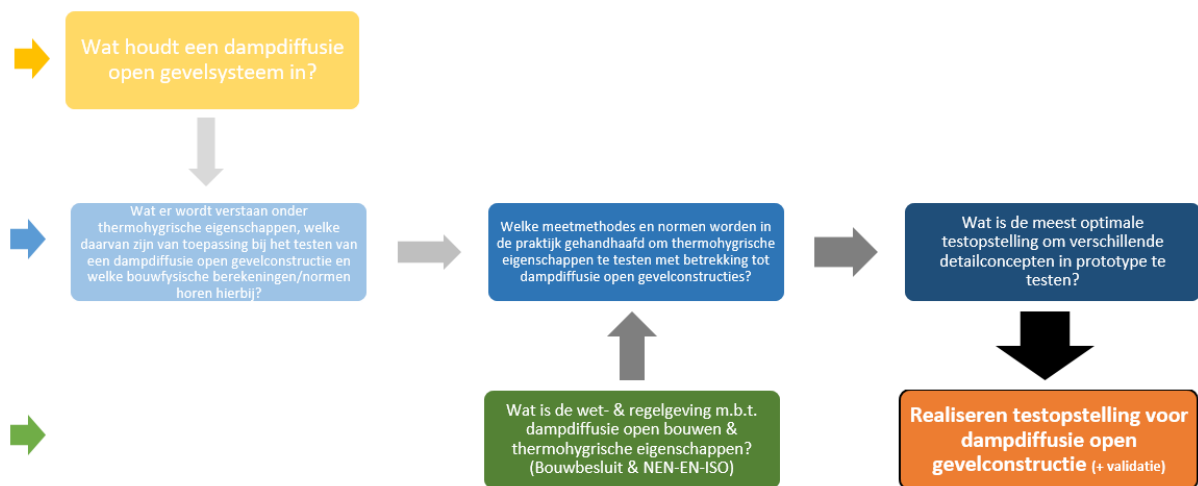
Wat is het optimale ontwerp voor een bouwphysische meetopstelling voor het meten van de thermohygrische eigenschappen van een biobased gevelelement in een dampdiffusie open gevelconstructie, conform de Nederlandse wet- & regelgeving en normen.

2.2. Deelvragen

1. Wat houdt een dampdiffusie open gevelsysteem in?
2. Wat er wordt verstaan onder thermohygrische eigenschappen, welke daarvan zijn van toepassing bij het testen van een dampdiffusie open gevelconstructie en welke bouwphysische berekeningen horen hierbij?
3. Wat zijn de Nederlandse wet- & regelgevingen en normen voor dampdiffusie open gevelconstructies en metingen?
4. Welke meetmethodes worden in de praktijk gehandhaafd om thermohygrische eigenschappen te testen met betrekking tot dampdiffusie open gevelconstructies?
5. Wat is de meest optimale testopstelling om verschillende dampdiffusie open gevelconstructies in te testen?

2.3. Op te leveren (tussen)producten

- Literatuurstudie naar wat een dampdiffusie open gevelconstructie inhoudt.
- Literatuurstudie naar wat er wordt verstaan onder thermohygrische eigenschappen en welke daarvan van toepassing is bij het testen van een dampdiffusie open gevelconstructie met bijhorende formules.
- Deskresearch naar de wet & regelgeving en normen t.b.v. het testen van dampdiffusie open gevelconstructies.
- Fieldresearch en praktijkstudie naar welke meetmethodes er worden gehandhaafd m.b.t. het testen van dampdiffusie open gevelconstructies.
- Een studie naar het optimale ontwerp voor een testopstelling aan de hand van de data uit gevonden meetmethodes.
- Ontwerp testopstelling t.b.v. testen van dampdiffusie open gevelconstructies.



Figuur 2: Schema plan van aanpak

3. Onderzoeksmethodiek

Dit onderzoek naar de ontwikkeling van een testopstelling ten behoeve van het testen van een dampdiffusie open gevelsysteem betreft een kwalitatief ontwerpend onderzoek. Het gaat hierbij om een open vraagstelling met betrekking tot het probleem. De streefrichting van het onderzoek is het ontwikkelen van een testopstelling voor het testen van dampdiffusie open gevelconstructies. Wat hiervoor nodig is, is echter deels onbekend. Deze ontwerpmethodiek geeft daarom een abstract beeld van het einddoel en eindproduct. Bij een kwalitatieve benadering is er ruimte voor aanpassing tijdens het onderzoek en is er de mogelijkheid om door te vragen. Door middel van deze ruimte en mogelijkheid kan het onderzoek te allen tijde bijgesteld worden, zodat de voortgang naar de streefrichting behouden kan worden.

"Ontwerpen betekent op een systematische wijze bedenken en ontwikkelen van een oplossing voor een probleem." (Berg & Kouwenhoven, 2008).

"Een meeromvattende definitie van ontwerponderzoek luidt: een systematische benadering van (onderwijs)problemen, waarin door middel van geïntegreerde ontwerp- en onderzoeksactiviteiten een tweeledig doel wordt nagestreefd: praktijkverbetering en kennisgroei." (Berg & Kouwenhoven, 2008).

Dit onderzoek bestaat uit een vooronderzoeksfase en een ontwerpfase, waarin de vooronderzoeksfase bestaat uit verschillende analyses. Tijdens de vooronderzoeksfase staan verkenning en analyse centraal. En wordt er informatie verworven die de contouren aangeeft voor de oplossing. Door middel van het vooronderzoek worden randvoorwaarden opgesteld waarna in de ontwerpfase de uitvoerbaarheid en haalbaarheid omschreven wordt.

De analyse in het vooronderzoek bestaat uit 4 onderdelen:

1. Een behoefteanalyse.
2. Een context analyse.
3. Een literatuurstudie.
4. Kwalitatieve dataverzameling

De analyse naar de behoefte resulteert erin dat duidelijk naar voren komt wat het Centre of Expertise Biobased Economy (CoEBBE) wilt van het onderzoek, maar ook wat er werkelijk nodig is voor de probleemoplossing. De contextanalyse zal bestaan uit een omschrijving van de omgeving. Hierbij wordt aangegeven wat binnen de mogelijkheden van het CoEBBE valt, om 'wishful thinking' te voorkomen en te kijken naar wat daadwerkelijk haalbaar is. Dit zal leiden naar een specifieke en concrete hoofd- & deelvraagstelling. Een literatuurstudie is nodig om de meeste recente informatie en ontwikkelingen te verkrijgen. In dit onderzoek houdt dat in dat er studie wordt gedaan naar het principe van hoe een dampdiffusie open gevelsysteem werkt. Tevens dient er een studie te worden gedaan naar wat de normen en wetten zijn die van toepassing zijn bij het testen van een dampdiffusie open gevelconstructie.

Het vierde onderdeel betreft een praktische aanpak waarbij er informatie verworven wordt door te kijken naar goede voorbeelden. Hierbij worden personen van bedrijven geïnterviewd die gelijksoortige activiteiten uitvoeren met betrekking tot het testen van gevelelementen op bouwfysische aspecten. Tevens worden goede voorbeelden geanalyseerd om een indicatie te krijgen van een testopstelling die nodig is voor de oplossing.

3.1. Kwalitatieve dataverwerking

De in het vooronderzoek verzamelde data wordt verwerkt op een structurele en verantwoorde manier, zodat de essentie van de informatie concreet en specifiek naar voren komt. De verzamelde data zal afkomstig zijn uit interviews en deskresearch. De data afkomstig uit de deskresearch wordt verantwoord door de bijbehorende bron volgens wijze van APA te noteren. Een deel van deze studie is al van start gegaan bij [hoofdstuk 4. Theoretisch Kader](#) in de vorm van literatuurstudie. De data afkomstig uit interviews wordt verwerkt door middel van een samenvatting en verificatie. Het onderzoek betreft een kwalitatief ontwerpend onderzoek, waarbij het principe ligt bij het ontwerpen. Interviews worden uitgevoerd in de vorm van ongestructureerde interviews. Hierbij zijn er veel mogelijkheden om het gesprek de kant op de sturen die nodig is om de juiste informatie te krijgen. Op deze manier kan de respondent vrij meedenken bij het ontwerpen van de testopstelling en is het mogelijk om het interview buiten het interviewschema te laten voortgaan om lastig te verkrijgen informatie alsnog te verwerven. Interviewen is een tijd consumerende manier van dataverzameling, echter kan op deze wijze wel efficiënt en gericht informatie worden verworven door middel van de juiste vragen te stellen aan de respondent. Omdat dit onderzoek een kwalitatieve aanpak betreft worden het aantal interviews beperkt. Dit is tevens vanwege het tijd consumerende aspect van interviewen (Glabbeek, 2012). De respondenten voor het interviewen worden geselecteerd naar aanleiding van deskundigheid, willigheid en haalbaarheid. Tabel 1 geeft een schema weer waarin de respondenten genoteerd staan die eventueel benaderd worden, waarbij subparagraaf [3.2.2. Steekproef](#) de selectiegroep nader omschrijft. Interviews kunnen op verschillende manieren worden uitgevoerd. Dit is in dit onderzoek onder andere afhankelijk van de haalbaarheid met betrekking tot reistijd en kosten. Om deze reden zijn sommige 'interviews' uitgevoerd door middel telefonisch of e-mail contact.

Respondent(en) in functie	Structuur	Type interview
Deskundige dampdiffusie open bouwen	Half gestructureerd	Expertinterview
Deskundige toegepaste bouwfysica	Half gestructureerd	Expertinterview
Deskundige bouwfysisch laboratorium	Half gestructureerd	Expertinterview

Tabel 1: Respondent(en) schema

3.2. Populatie

Een ontwerponderzoek is ongeschikt om een beschrijving te geven voor grotere populaties (Berg & Kouwenhoven, 2008). Een ontwerponderzoek richt zich op het ontwikkelen van een nieuw principe/product. De onderzoeker zegt niets concreet over een bepaald onderwerp zoals gebeurt bij bijvoorbeeld een beschrijvend of toetsend onderzoek. Echter kunnen er wel eenheden genoteerd worden die gerelateerd zijn aan het hoofdonderwerp en doelstelling van het onderzoek.

3.2.1. Eenheden

Tabel 2 geeft de onderzoekseenheden weer met bijhorende kenmerken binnen dit onderzoek. Deze gezamenlijk vormen de populatie.

Eenheden	Kenmerken
Dampdiffusie open bouwen	Thermohygrische eigenschappen. Locatie en klimatologie.
Testopstellingen	Conform randvoorwaarden gevonden uit literatuurstudie en P.v.E. CoEBBE. Dient geschikt te zijn voor bouwfysische toetsing als in dampdiffusie open gevelconstructies. Conform de Nederlandse alsmede de Internationale Wet- & regelgeving en normen.

Tabel 2: Overzicht eenheden

3.2.2. Steekproef

Het onderzoek betreft een ontwerponderzoek waarbij het doel is een testopstelling te ontwikkelen. Testopstellingen zijn daarom een onderzoekseenheid waarover wat gezegd wordt (zie Tabel 2). Echter betreft die niet alle testopstellingen, maar wordt er een specifieke steekproef gedaan waar onderzoek naar wordt uitgevoerd. Zoals weergegeven in Tabel 2 bevatten de onderzoekseenheden kenmerken die wat vertellen over deze eenheden en daarmee ook over de steekproef. Het resultaat van dit onderzoek zal leiden naar een schetsontwerp voor een testopstelling die dient te voldoen aan de volgende eigenschappen:

- Het kunnen testen van bouwfysische (thermohygrische) eigenschappen als in dampdiffusie open gevelconstructies.
- Het kunnen testen conform de Nederlandse wet- & regelgeving en normen.

3.3. Ethische verantwoording

Een onderzoek wordt geschreven over mensen, objecten en/of situaties en heeft dus ook invloed hierop. Tevens kan een onderzoek afhankelijk zijn van gegevens van verstreckende personen/partijen. De ethische waarde van de samenwerking met deze personen en partijen dient te allen tijde gewaarborgd en verantwoord te worden. In paragraaf [3.1. Kwalitatieve dataverwerking](#) is beschreven dat er interviews gehouden dienen te worden met de in Tabel 1 genoemde respondenten. Om de ethische verantwoording, tijdens en na deze interviews, te waarborgen worden richtlijnen aangehouden die zijn weergegeven in Tabel 3.

- Respondenten worden op de hoogte gesteld van de probleem- & doelstelling van het onderzoek.
- Respondenten worden met respect behandeld, zo dient de interviewer wederzijds met respect behandeld te worden.
- Transcripten/samenvattingen worden beschermd en uitsluitend gebruikt voor dit onderzoek alsmede worden deze niet vrijgegeven aan derden, indien de respondent hier geen toestemming voor geeft.

Tabel 3: Richtlijnen ethische verantwoording

3.4. Risico's

Het gewenste resultaat is dat het gehele onderzoek verloopt zoals van tevoren is bedacht. Echter is dit niet altijd het geval en zullen er risico's aan het onderzoek gekoppeld zitten. Het is verstandig om op voorhand over deze risico's na te denken en mogelijke oplossingen hierbij te bedenken.

Risico's	Eventuele oplossing
Partijen die niet willig zijn mee te werken aan de dataverzameling.	Contact zoeken met bekende partijen via personen die betrokken zijn bij dit onderzoek. Opdrachtgever of docentbegeleider kan hierbij helpen. Tevens kunnen andere personen binnen het CoEBBE of de HZ gevraagd worden.
Eventuele kosten te hoog voor het budget.	Tijdig bespreken met de opdrachtgever om in overleg oplossingen te zoeken.
Tijdgebrek	Het onderzoek eerder afronden en een advies schrijven voor een eventueel vervolgonderzoek.
Taalgebrek	Niet vaardig in talen buitenom Nederlands en Engels

Tabel 4: Risico's & oplossingen

3.4.1. Afbakening

Het komt regelmatig voor dat een onderzoek toepasbaar is voor een groot draagvlak met betrekking tot een probleem. Dit kan ervoor zorgen dat een onderzoek te breed opgezet en/of uitgevoerd wordt. Echter is het doel van een onderzoek vaak dat er gezocht wordt naar een specifieke en concrete conclusie. Om tot hier te komen worden onderzoeken en onderzoeksvragen afgebakend. Daarmee kan de specifieke onderzoeksrichting concreet worden aangegeven (Afstudeerbegeleider).

Om dit onderzoek de juiste richting op te sturen en diepgang te geven wordt er per onderzoeksvraag de afbakening gegeven. Omdat dit een ontwerponderzoek betreft is de afbakening dynamisch en verandert deze mee met het proces van het onderzoek. De afbakening kan op verschillende manieren en om verschillende redenen worden toegepast zoals bijvoorbeeld; perspectief, plaats, tijd, sector (Scriptium, sd). Per onderzoeksvraag wordt er naar deze aspecten gekeken en de bijhorende afbakening gegeven (zie Tabel 5).

Hoofd- & deelvragen	Afbakening
<i>Wat is het optimale ontwerp voor een bouw fysische meetopstelling voor het meten van de thermohygrische eigenschappen van een biobased gevelement in een dampdiffusie open gevelconstructie, conform de Nederlandse wet- & regelgeving en normen.</i>	Perspectief -
	Plaats Dataverzameling wordt uitgevoerd binnen de haalbaarheid met betrekking tot afstand, kosten en tijd.
	Sector Uitsluitend binnen de bouwsector. Hierbij wordt wel informatie gezocht binnen de klimaat- en installatietechniek, maar dit wordt niet nader onderzocht.
	Tijd Van 30-01-2017 t/m 30-06-2017. Dit is de totale periode van het afstuderen met betrekking op de oriënterende, uitvoerende en afrondende fases.
1. <i>Wat houdt een dampdiffusie open gevelsysteem in?</i>	Perspectief Uitsluitend binnen het principe van biobased bouwen.
	Plaats Informatie wordt op internationaal gebied gezocht, maar het wordt uitsluitend op Nederlands gebied toegepast.
	Sector Uitsluitend binnen de bouwsector.

2. Wat er wordt verstaan onder thermohygrische eigenschappen, welke daarvan zijn van toepassing bij het testen van een dampdiffusie open gevelconstructie en welke bouw fysische berekeningen horen hierbij?	Perspectief	Met betrekking tot dampdiffusie open bouwen: - o Damptransport - o Dampdiffusieweerstand(coëfficiënt) - o Dampspanning - o Temperatuur - o Absolute- & relatieve luchtvochtigheid - o Inwendige condensatie
	Plaats	Dataverzameling wordt uitgevoerd binnen de haalbaarheid met betrekking tot afstand, kosten en tijd.
	Sector	Uitsluitend binnen de bouwsector.
3. Wat zijn de Nederlandse alsmede de Internationale Wet- & regelgeving en normen voor dampdiffusie open gevelconstructies en metingen?	Perspectief	Bouwbesluit NEN-EN-ISO normen ASTM normen
	Plaats	Dataverzameling wordt uitgevoerd binnen de haalbaarheid met betrekking tot afstand, kosten en tijd.
	Sector	Uitsluitend binnen de bouwsector.
4. Welke meetmethodes worden in de praktijk gehandhaafd om thermohygrische eigenschappen te testen met betrekking tot dampdiffusie open gevelconstructies?	Perspectief	Bouw fysische adviesbureaus/experts Bouw fysische laboratoria.
	Plaats	Dataverzameling wordt uitgevoerd binnen de haalbaarheid met betrekking tot afstand, kosten en tijd.
	Sector	Uitsluitend binnen de bouwsector.
5. Wat is de meest optimale testopstelling om verschillende randoplossingen in te testen?	Perspectief	Uitsluitend dampdiffusie open bouwen.
	Plaats	Dataverzameling wordt uitgevoerd binnen de haalbaarheid met betrekking tot afstand, kosten en tijd.
	Sector	Uitsluitend binnen de bouwsector.

Tabel 5: Afbakening onderzoeksvragen

3.4.2. Referentie onderzoek

Om een realistisch beeld te krijgen over het uit te voeren werk binnen het tijdsbestek is er gekeken naar een vergelijkbaar onderzoek. Deze is uitgevoerd door derde jaars studenten aan de HZ University of Applied Sciences & Avans Hogeschool en zij hebben dit onderzoek uitgevoerd bij het CoEBBE voor hun Minor. Het doel van dat onderzoek is om geluidsabsorptie te bestuderen en hierbij een testopstelling te ontwikkelen waarmee materialen getest konden worden op geluidsabsorptie. Het principe van hun onderzoek is vrijwel hetzelfde als dit onderzoek, echter richt dit onderzoek zich op het bestuderen en testen van thermohygrische eigenschappen bij dampdiffusie open bouwen. In het onderzoek naar geluidsabsorptie hebben twee studenten van de HZ University of Applied Sciences aan dit onderzoek gewerkt en zijn zij versterkt met een ICT student van Avans Hogeschool. Tevens hebben zij in dit onderzoek de opstelling praktisch gerealiseerd en daarbij metingen uitgevoerd. Na gesprek met deze jongens is naar voren gekomen dat circa 50% van de tijd van het onderzoek uitging naar het praktische deel. Dit onderzoek naar dampdiffusie openheid wordt uitgevoerd door één persoon, wat betekent dat er aanzienlijk minder werk verzet kan worden, vergeleken met het gelijksoortige onderzoek naar geluidsabsorptie dat door drie personen is uitgevoerd. Om een realistisch beeld te schetsen van wat uitgevoerd kan worden binnen het tijdsbestek van dit onderzoek is er een realistische lijn getrokken voor de doelstelling. Deze geeft aan tot waar het onderzoek waarschijnlijk zal komen, ook al ligt de doelstelling verder. De verder liggende doelstelling is alsnog gesteld, omdat het onbekend is hoe de voortgang loopt van dit onderzoek. Indien deze vlot verloopt en er nog tijd beschikbaar is, zal het onderzoek doorgaan richting de doelstelling.

3.5. Kosten

Dit onderzoek bevat eventueel kosten in verband met het realiseren van prototypes en testopstellingen. In het overleg met de opdrachtgever is op 9 februari 2017 aangegeven dat er budget beschikbaar is voor eventuele kosten. Het beschikbaar stellen van dit budget is op voorhand overlegd met de opdrachtgever. De activiteiten die onder 'Geen kostenpost' vallen betreffen activiteiten die uitgevoerd kunnen worden binnen de grenzen van de opleiding. Zo wordt het onderzoek uitgevoerd met betrekking tot het afstuderen en betreft dit een bachelor scriptie, waar geen extra kosten voor worden gerekend (zie Tabel 6).

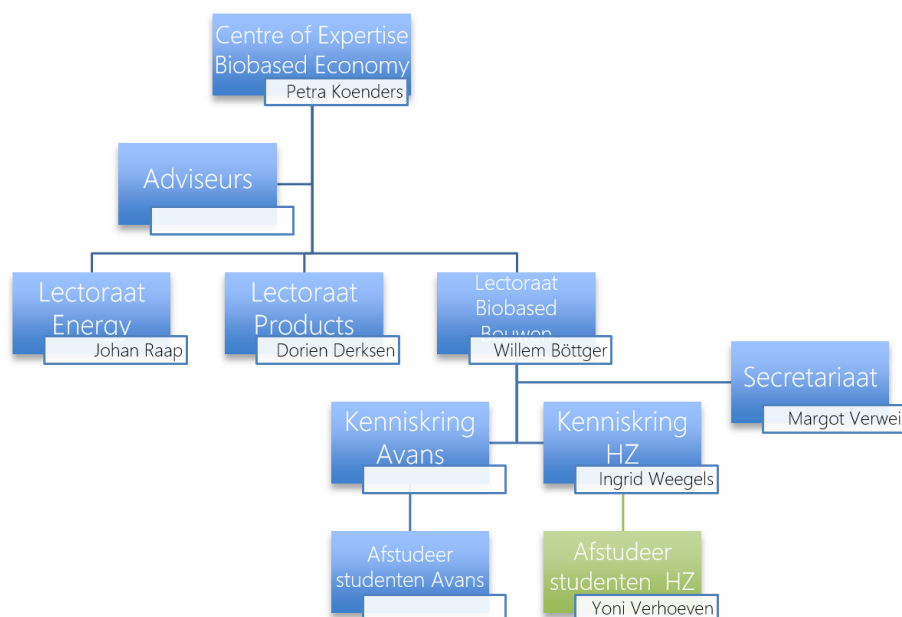
Eventuele kostenpost	Geen kostenpost
Data afkomstig van bedrijven/externe partijen	Literatuurstudie
	Kwalitatieve dataverzameling

Tabel 6: Kostenposten

4. Theoretisch kader

4.1. Centre of Expertise Biobased Economy, lectoraat biobased bouwen

Het Centre of Expertise Biobased Economy (CoEBBE) is in 2012 opgericht door Avans Hogeschool en Hogeschool Zeeland en wordt ondersteund door het ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen. Het CoEBBE heeft als missie het ondersteunen van bedrijven in hun biobased ambities door met hen hbo-onderwijs te vernieuwen en toegepast onderzoek uit te voeren. De visie van het CoEBBE is dat uitstekend opgeleide professionals zorg dragen voor de transitie naar een biobased samenleving. Zo is het CoEBBE actief op verschillende vlakken, waaronder onderwijs aan studenten, communicatie en voorlichting aan de samenleving in het algemeen en het bedrijfsleven in het bijzonder. Het CoEBBE bestaat uit drie lectoraten waarvan het lectoraat Biobased Bouwen de nieuwste toevoeging is sinds april 2015, naast Biobased Energie en Biobased Products (zie Figuur 3). Het lectoraat Biobased Bouwen zal in samenwerking met onderwijs, ondernemers en overheid op zoek gaan naar toegevoegde waarde voor de gebruikers en daarmee de gehele keten. (Koenders, 2016). Lector W. Böttger is verantwoordelijk voor het lectoraat Biobased Bouwen. Tevens is hij directeur innovatie bij NPSP Composieten, een bedrijf dat biobased, vezel versterkte kunststof producten voor de bouw, design, mobiliteit en industrie ontwikkelt (Lectoraat Biobased Bouwen). Dhr. Böttger zegt te hopen de actiegerichtheid van NPSP door te kunnen zetten in het lectoraat met de daarbij behorende vele experimenten, vormstudies en prototypes. Eén van de missies die in het lectoraatsplan genoteerd staat is om meer dan 50 studenten afgestudeerd te hebben op een biobased onderwerp. Daarnaast zijn er ook doelen als onder andere; Biobased te integreren in alle jaren van het onderwijs, 20 bedrijven direct betrokken te hebben bij projecten en 200 bedrijven bewust maken en op de hoogte stellen van de resultaten en aanpak. Dhr. Böttger zijn missie is, dat aan het einde van het lectoraat het maatschappelijk draagvlak voor 'biobased' vergroot is en dat men weet wat de toegevoegde waarde van biobased bouwen biedt (Böttger, 2016). Figuur 3 geeft het organogram weer met contactpersonen binnen het Centre of Expertise Biobased Economy, het lectoraat Biobased Bouwen en de HZ University of Applied Sciences.



Figuur 3: Organogram CoEBBE (contactpersonen).

4.2. Dampdiffusie open bouwen

Een dampdiffusie open systeem houdt in dat het vocht dat binnen in het gebouw in de lucht zit, door de constructie naar buiten getransporteerd kan worden. Dit transport gebeurt bij de wisseling van temperaturen en is afhankelijk van de dampdruk. Dit transport is meestal naar buiten gericht (Meerkerk & Vries, 2016). Een groot aantal biobased bouwmaterialen hebben als eigenschap dat deze een vochtregulerend vermogen hebben. Dat houdt in dat deze zelfstandig gemakkelijk vocht kunnen opnemen en weer afstaan. (Prinsen, SBRCUR, 2016).

"Belangrijk is dat alle naden goed luchtdicht gemaakt dienen te worden. De binnenlucht mag niet via kieren in de gevelconstructie terecht komen (deze kan daar namelijk condenseren op relatief koudere oppervlakten)" (Bos, 2014). Belangrijk is dat er geen dampdichte delen en de juiste folies worden toegepast.

4.3. Vochtige lucht

"Waar lucht is, is ook vocht. Vaak onzichtbaar, in dampvorm aanwezig" (Meerkerk & Vries, 2016).

Dit citaat beschrijft dat er zich nagenoeg overal vocht bevindt, dit in verband met lucht. Hierom bevindt vocht zich ook binnen in woningen en gevels. Indien dit vocht niet afgevoerd wordt kan dit voor problemen zorgen voor zowel het binnenklimaat als voor de woning zelf. Lucht met hoge temperaturen bevat meer vocht dan lucht met lagere temperaturen.

"Vochtige lucht is op zichzelf niet zo'n probleem, maar het vormt een voedingsbodem voor schimmels en huisstofmijt. De gevolgen daarvan zijn inmiddels bekend: allergieën, luchtwegproblemen, astma, chronische verkoudheid et cetera." (VROM, 2006).

Een dampopen systeem of correcter; een dampdiffusie open systeem kan dus, door middel van ventilatie, voor een gezonder leefklimaat zorgen binnen een bouwwerk.

4.4. Ventileren en energiebesparing

Een gezond leefklimaat creëren kan onder andere door goed te ventileren in een gebouw. Echter schijnt het een tegenstrijd te hebben met de energiebesparing, doordat er opgewarmde lucht afgevoerd wordt. Toch is dit niet geheel het geval, omdat vochtige lucht langzamer opwarmt dan droge lucht. Hierdoor heb je meer energie nodig om de vochtige lucht op te warmen ten opzichte van de droge lucht. (VROM, 2006)

Het opwarmen van een dampdiffusie open gebouw, waarin vochtige lucht zich bevindt, is vergelijkbaar met een zeeklimaat waar onder andere Nederland zich in begeeft. Dit met betrekking tot de vochtigheid van de lucht, waarbij vochtige lucht moeizamer opgewarmd kan worden ten opzicht van droge lucht. Tevens houdt de vochtige lucht de warmte langer vast die deze vervolgens langer uitstoot. In verband met het zeeklimaat is dit te vergelijken lage verschillen tussen de winter en zomer ten opzicht van een binnenlandsklimaat. (VROM, 2006; Wikipedia, 2016; Groenhart houtskeletbouw, 2015).

4.5. Thermohygrische eigenschappen

Thermohygrische eigenschappen zijn kenmerken die typerend zijn voor een product met betrekking tot bouwphysica en heeft betrekking op vele aspecten. Echter zijn niet alle aspecten van toepassing op dampdiffusie open bouwen. Er wordt daarom naar een beperkt aantal aspecten gekeken waar dampdiffusie open bouwen direct invloed op heeft. Deze hebben over het algemeen te maken met vocht/damp opname en -afvoer.

- Temperatuur
- Absolute- & relatieve luchtvochtigheid
- Dampspanning
- Waterdampdiffusieweerstand (coëfficiënt)
- Wateropname door diffusie
- Damptransport

(Architecten Gilde; Bouwcentrum advies; Stybenex),

4.6. Wet & regelgeving en normen

"Testen en toetsen zijn detectieve kwaliteitsmaatregelen die er op gericht zijn vast te stellen of bepaalde problemen of tekortkomingen zich (toch) manifesteren. Waarbij toetsen het beoordelen van tussenproducten tijdens het ontwikkelingsproces is. Testen is het aantonen of het opgeleverde product voldoet aan de gestelde specificaties." - (Toets je parate kennis over, 2016)

Het onderzoek betreft een testopstelling voor biobased dampdiffusie open gevelconstructies die getest dient te worden aan gestelde specificaties. Deze specificaties zijn afkomstig uit wet- & regelgeving en normen. Deze wet- & regelgeving kan zowel nationaal als internationaal worden toegepast. Dit is afhankelijk van de markt waarin het product geïntroduceerd wordt. Om de marktbreedte te vergroten is het verstandig om het product ook te testen aan de specificaties op internationaal gebied. Hieronder zijn een aantal wet- & regelgevingen en normen opgesomd die mogelijk kunnen gelden voor het testen van dampdiffusie open gevelconstructies.

Nationaal	Internationaal
Bouwbesluit	WUFI
NEN-normen	NEN-EN-ISO normen
	ASTM Standards

5. Resultaten

Dit onderzoek is opgebouwd uit verschillende deelonderzoeken die samen komen in dit rapport. Deze deelonderzoeken zijn gebaseerd op de deelvragen weergegeven in [paragraaf 2.2](#). De resultaten in dit hoofdstuk zijn onderverdeeld in deze deelonderzoeken die op chronologische volgorde zijn weergegeven. Voor verdere gedetailleerde informatie over de resultaten, wordt verwezen naar de bijlagen.

5.1. Dampdiffusie open bouwen

Een dampdiffusie open systeem houdt in dat het vocht dat binnen in het gebouw in de lucht zit, door de constructie naar buiten getransporteerd kan worden. Dit transport gebeurt bij de wisseling van temperaturen en is afhankelijk van de dampspanning. Dit transport is meestal naar buiten gericht. (Meerkerk & Vries, 2016). Een groot aantal biobased bouwmaterialen hebben als eigenschap dat deze een vochtregulerend vermogen hebben. Dat houdt in dat deze zelfstandig gemakkelijk vocht (damp) kan opnemen en weer afstaan. (Prinsen, Bouwen met biobased materialen, 2016). De richting en het transport van deze damp wordt bepaald door het verschil tussen de interne en externe dampspanning. De dampspanning wordt bepaald door de temperatuur, waarbij bij hogere temperaturen ook hogere dampspanningen behaald kunnen worden. De kans is groot dat, in Nederland, de dampspanning binnen hoger is dan buiten. Indien er geen scheidingselement aanwezig is zal de vochtigheid zich verplaatsen om evenwicht te creëren tussen de verschillende dampspanningen. Echter bij een bouwwerk is deze scheiding wel aanwezig en zorgt ervoor dat dit proces vertraagd wordt (Prinsen, Dampopen bouwen doe je zo, 2015). Hierbij is het belangrijk dat er geen dampdichte delen worden toegepast en daarbij wel gebruikt wordt gemaakt van de juiste folies.

"Belangrijk is dat alle naden goed luchtdicht gemaakt dienen te worden. De binnenlucht mag niet via kieren in de gevelconstructie terecht komen (deze kan daar namelijk condenseren op relatief koudere oppervlakten)." (Bos, 2014).

De effectiviteit van dampdiffusie open bouwen is momenteel nog discutabel, maar dit onderzoek richt zich hier niet op. Dampdiffusiedicht bouwen is uitsluitend te realiseren met materialen zonder poriën, waar vochttransport in plaats kan vinden in de vorm van dampdiffusie. Materialen die zogenaamd 'dampdicht' zijn, bevatten een dampdiffusieweerstandcoëfficiënt (μ -waarde) die 'oneindig' is. Hieronder vallen onder andere glas, schuimglas, metalen, graniet, basalt, hardsteen en marmer (Architecten Gilde), (Bouwcentrum advies). In de kennispaper: Dampopen bouwen doe je zo van SBRCURnet (Prinsen, Bouwen met biobased materialen, 2016), is weergegeven dat er geen vochtophoping aanwezig mag zijn in een dampdiffusie open constructie. Dit vertaalt zich in de praktijk naar dat het door de gevel opgenomen vocht, op jaarbasis, volledig afgegeven dient te worden. Er mag dus op jaarbasis geen vocht (damp) overblijven in de gevelconstructie. Indien dit zich wel voordoet, zal de hoeveelheid vocht van het herhaaldelijk proces toenemen. Dit kan uiteindelijk tot onder andere vochtschade leiden. Voor dit onderzoek heeft dit als gevolg dat in de testopstelling een klimaat simulatie nagebootst dient te worden die uitgaat van een jaar als cyclus, waarbij zich geen vochtophoping mag voordoen.

De kenmerken die bij dampdiffusie open bouwen naar voren zijn gekomen uit verschillende bronnen zijn met elkaar vergeleken om overeenkomsten te bepalen. Deze overeenkomsten zijn opgesomd en weergegeven als randvoorwaarden voor het realiseren van een dampdiffusie open systeem. Deze randvoorwaarden zijn hieronder weergegeven.

- Constructies dienen hoge prestatie op luchtdichtheid te hebben.
- Constructies dienen een isolerende werking te hebben.
- Constructies dienen aan de buitenzijde winddicht te zijn om drukverschillen te voorkomen in de constructie (kierdichting is cruciaal).
- De dampdiffusieweerstand aan de binnenzijde dient hoger te zijn dan aan de buitenzijde. Hierbij is de damptransportrichting naar buiten gericht.
- In de constructie mag geen ophoping van vocht aanwezig zijn.
 - Kierdichting is cruciaal bij dampopen bouwen.
 - Isolatielaag dient bestendig te zijn tegen vocht en heeft een vochtregulerend vermogen (vochtbuffer). Hierbij is het belangrijk dat de Rc-waarde van het isolatie materiaal 'niet' vermindert.
- Dampremmende folies niet toepassen.
- De gevelopbouw is zodanig ontworpen dat er geen inwendige condensatie kan plaatsvinden. Indien dit zich wel voordoet dient de gevel in staat te zijn dit binnen een jaar af te voeren, waardoor er op jaarbasis geen vochtophoping ontstaat.
- De materiaallagen aan de buitenzijde (spouwzijde) van de wand dienen voldoende dampdoorlatend te zijn.
- Isolatie materiaal dient een vochtregulerend vermogen te hebben, waarbij het belangrijk is dat deze vocht kan opnemen en afgeven. Biobased materialen bevatten deze eigenschap vaak.
- Koudebruggen dienen voorkomen te worden.
- Binnenzijde dient niet 'dichtgesmeerd' te worden met een dampdiffusie dichte laag.

5.2. Klimatologie in Nederland

In [paragraaf 5.1](#) is weergegeven dat het principe van dampdiffusie open bouwen gebaseerd is op vochttransport met betrekking tot dampdiffusie. De dampdiffusie ontstaat door een aanwezig verschil tussen dampspanningen wat een gevolg is van een heersende temperatuur. Uit gesprek met dhr. P. Kuindersma op 27 februari is naar voren gekomen dat er drie factoren zijn die gecontroleerd dienen te worden om een simulatie tot stand te brengen met betrekking tot het testen van een dampdiffusie open constructie. Dit zijn de factoren; temperatuur, relatieve luchtvochtigheid & dampspanning. Voor een correcte simulatie dient de praktijk nagebootst te worden.

"Moisture is a very complex process and the knowledge of moisture transfer mechanisms, material properties, initial conditions and boundary conditions is often limited. Therefore this International Standard lays down simplified calculation methods, which assume that moisture transport is by vapour diffusion alone and use monthly climate data." – NEN-EN-ISO 13788: 2013 (Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut). Dit citaat afkomstig uit ISO 13788: 2013 toont aan dat in de normen gebruik wordt gemaakt van maandelijkse waarden voor het klimaat. Deze methode zal worden terug gebracht in de simulaties van de testopstelling.

S. Uittenbosch (2012) omschrijft in zijn rapport; 'Risico van inwendige condensatie in een externe', dat er drie manieren zijn om het buitenklimaat te bepalen. Een mogelijke uitgangssituatie gegeven voor het buitenklimaat, is afkomstig uit de NEN-EN 13788. S. Uittenbosch beweert dat deze methode gebruikt kan worden indien de locatie niet bekend is. Indien de locatie wel bekend is kan deze informatie verkregen worden door eigen metingen te verrichten met behulp van NEN-EN-ISO 15927-1 of door data van onder andere het KNMI. Voor het binnenklimaat kan gebruik gemaakt worden van onder andere binnenklimaatklassen. Er is geen locatie bekend om metingen uit te voeren voor het bepalen van het buitenklimaat. Echter is de data van het KNMI nader onderzocht om een landelijk maangemiddelde te

bepalen. Er is een keuze gemaakt om het klimaat binnen Nederland te bestuderen en het internationale gebied buiten beschouwing te laten met betrekking tot het bepalen van een simulatie. Deze keuze is gemaakt in overleg met de opdrachtgever, waarin is besloten om de klimaat focus op Nederland te houden. Hierbij worden temperaturen gebruikt van -15°C tot en met 40°C (Peutz) en deze kunnen, indien nodig, naderhand uitgebreid worden.

Het KNMI geeft gegevens op verschillende manieren. Eén daarvan is de klimaatatlas, die het klimaat beschrijft in de periode 1981-2010. De klimaatatlas beschrijft de gemiddelde maandtemperaturen in Nederland over de periode 1981-2010. In combinatie met de waarden, die in de jaaroverzichten van 2009 tot en met 2016 worden weergegeven, kan een actuele maandgemiddelde temperatuur, die in Nederland heerst, worden berekend (zie Tabel 7). Naar aanleiding van gegevens uit de klimaatatlas van het KNMI zijn de maandgemiddelde dampdruk en relatieve vochtigheid berekend die zijn weergegeven in Tabel 8 en Tabel 9. In dit onderzoek heeft dit als gevolg dat deze maandgemiddelden vertaald kunnen worden naar een externe simulatieprogramma die gebruikt kan worden in de testopstelling.

jaar	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
2009	1.0	3.1	6.1	11.7	13.5	15.4	18.0	18.7	15.4	10.0	9.5	2.6
2010	-0.5	1.4	5.9	9.2	10.3	16.0	19.6	16.8	13.9	10.8	5.9	-0.8
2011	3.4	4.4	5.9	12.6	13.9	16.0	15.8	16.9	15.8	11.7	7.6	6.3
2012	4.8	0.6	7.8	8.2	13.7	14.8	17.1	18.5	14.5	10.7	7.1	4.9
2013	2.1	1.6	2.2	7.8	11.1	14.7	18.9	18.2	14.6	12.5	7.1	6.1
2014	5.5	6.4	8.2	11.6	13.3	16.0	19.5	16.3	16.3	13.6	8.4	5.1
2015	4.1	3.6	6.2	8.8	12.1	15.3	18.2	18.6	13.7	10.4	10.0	9.5
2016	4.7	4.7	5.4	8.5	14.1	16.3	18.2	18.1	17.9	10.4	6.1	5.1
Gemiddelde	3,1	3,2	6,0	9,8	12,8	15,6	18,2	17,8	15,3	11,3	7,7	4,9
Klimaatatlas	3,0	3,1	5,9	8,9	12,9	17,1	17,7	17,5	14,5	10,4	6,6	3,6
Gemiddelde	3,1	3,2	6,0	9,4	12,9	16,4	18,0	17,7	14,9	10,9	7,2	4,3

Tabel 7: Maandgemiddelde temperaturen n.a.v. jaaroverzichten, bron data; KNMI

	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Jaargem.
	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]
Gemiddelden	6,7	6,8	7,8	8,8	11,2	13,5	15,6	15,1	13,8	11,3	9,0	7,3	10,6

Tabel 8: Gemiddelde dampdruk per maand in Nederland, totaal aantal weerstations, klimaatatlas 1981-2010

	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Jaargem.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Gemiddelden	88	85	83	77	76	78	79	80	84	86	89	90	80,3

Tabel 9: Gemiddelde relatieve vochtigheid per maand in Nederland, totaal aantal weerstations, klimaatatlas 1981-2010

5.2.1. Wind en zonlicht

Zonlicht kan zorgen voor stralingswarmte waarbij de verhoogde temperatuur het vocht sneller zal laten verdampen. Dit heeft een positieve werking op het proces van vochtafvoer (Kuindersma, 2017). Wind of luchtstroming (convectie) is een gevolg van luchtdrukverschillen. Lucht stroomt langs de gevel waardoor de damp afgevoerd wordt en tevens de temperatuur daalt aan het buitenoppervlak van de gevel. Hierdoor komt er sneller ruimte voor de damp in de gevel om zich naar de drogere (koudere) buitenlucht te verplaatsen. Indien de gevelconstructies in de testopstelling voldoet zonder invloeden van zonlicht en wind, is het hoogstwaarschijnlijk dat deze ook voldoen als deze factoren wel zijn meegerekend. Wind en zonlicht worden daarom in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

5.2.2. De invloed van dag en nacht

De temperaturen zowel buiten als binnen kunnen per dag en nacht verschillen en dit heeft invloed op het damptransport (Dettling, 2017). Volgens dhr. Dettling dient dit verwerkt te worden in de simulaties, echter is het verder onbekend tot in hoeverre deze temperatuurschommeling invloed heeft op de duur van deze perioden. Indien de duur van de simulatie een jaar bedraagt, dan hebben de dag- en nachtschommelingen de invloed die het in de praktijk ook zou hebben. Indien de test op kortere periode wordt uitgevoerd, kan het zijn dat de duur van dag en nacht zodanig minimaal zijn dat het geen invloed heeft op de test. De invloed van dag- en nachtschommelingen in de simulaties zijn in dit onderzoek afhankelijk van de totale duur van de test.

5.2.3. Binnenklimaat

Het gedrag van mensen heeft invloed op het binnenklimaat. Zo wordt er vocht geproduceerd door onder andere handelingen als de was doen, koken en menselijke transpiratie. Deze verschillende vochtbronnen zorgen voor vochttoevoer binnen een gebouw. Daarentegen is er ook sprake van vochtafvoer door onder andere dampdiffusie, openingen en ventilatie (Hasselaar, 2015). Een comfortabel binnenklimaat is afhankelijk van de functie van het gebouw en de activiteiten die plaatsvinden binnen de ruimte. Tevens is de binnentemperatuur afhankelijk van de buitentemperatuur, echter verschilt dit per persoon (Kurvers, van der Linden, & H., 2012). Volgens onderzoek dat het WTCB heeft uitgevoerd is naar voren gekomen dat er slechts 3% aan vocht via diffusie een bouwwerk verlaat. 90% wordt via ventilatie afgevoerd en 7% gaat via luchtlekken (Tilmans & De Mets, 2017). Het is daarom onwaarschijnlijk dat dampdiffusie open bouwen ventilatie systemen kunnen vervangen. Echter dient de focus van dampdiffusie open bouwen te liggen op het 'drogen' van gevelconstructie indien hier vocht in terecht komt.

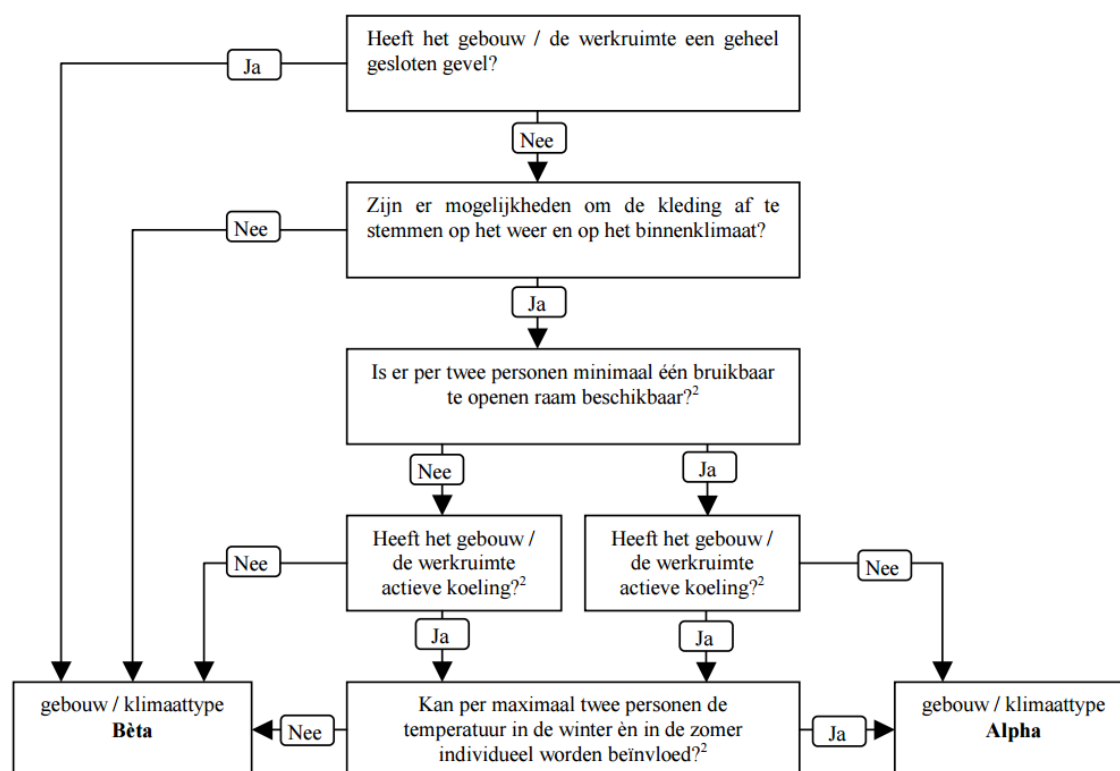
Het bepalen van het binnenklimaat kan op drie manieren worden bepaald. De gemakkelijkste en snelste manier is het gebruik van de binnenklimaatklassen (zie Tabel 10). Het enige dat deze klassen doen is het categoriseren van verschillende binnenklimaten. Het geeft een indicatie van welke temperaturen en relatieve vochtigheden aangehouden kunnen worden voor een bepaalde gebouwfunctie. Deze methode gaat uitsluitend uit van de functie en houdt echter geen rekening met een heersende buitentemperatuur.

Klimaatklasse (BKK)	Voorbeelden van gebruik ruimte	Optredende dampdruk in Pa	Temperatuur en relatieve vochtigheid
I	Opslagloodsen Garages Schuren	$1030 < P_1 \leq 1080$	18°C - 50 % tot 18°C - 52 %
II	Woningen Kantoren Winkels	$1080 < P_1 \leq 1320$	20°C - 46 % tot 20°C - 56 %
III	Scholen Verpleeginrichtingen Bejaardencentra Recreatiegebouwen	$1320 < P_1 \leq 1430$	22°C - 50 % tot 22°C - 54 %
IV	Wasserijen Zwembaden Drukkerijen	$P_1 > 1430$	24°C - 48 % en hoger

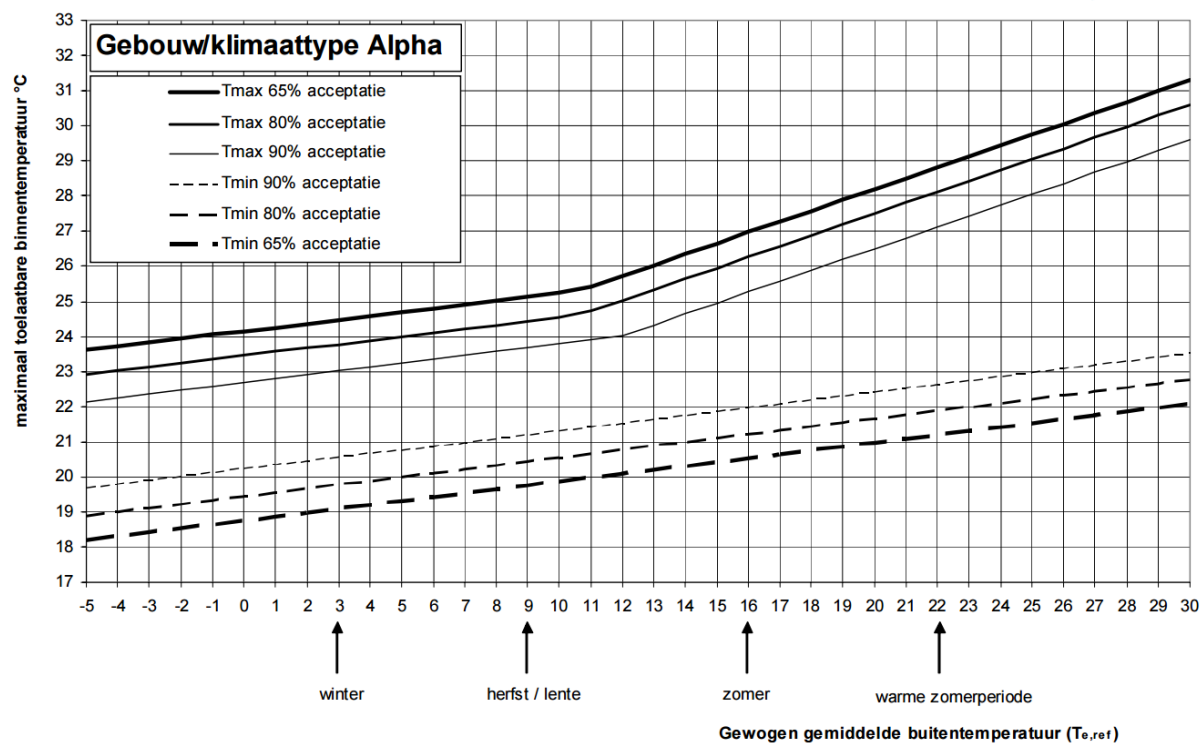
Tabel 10: binnenklimaatklassen in Nederland

Het binnenklimaat kan tevens bepaald worden door middel van de methode Fanger, De methode Gewogen Temperatuur Overschrijding (GTO) of de methode Adaptieve Temperatuur Grenswaarden (ATG).

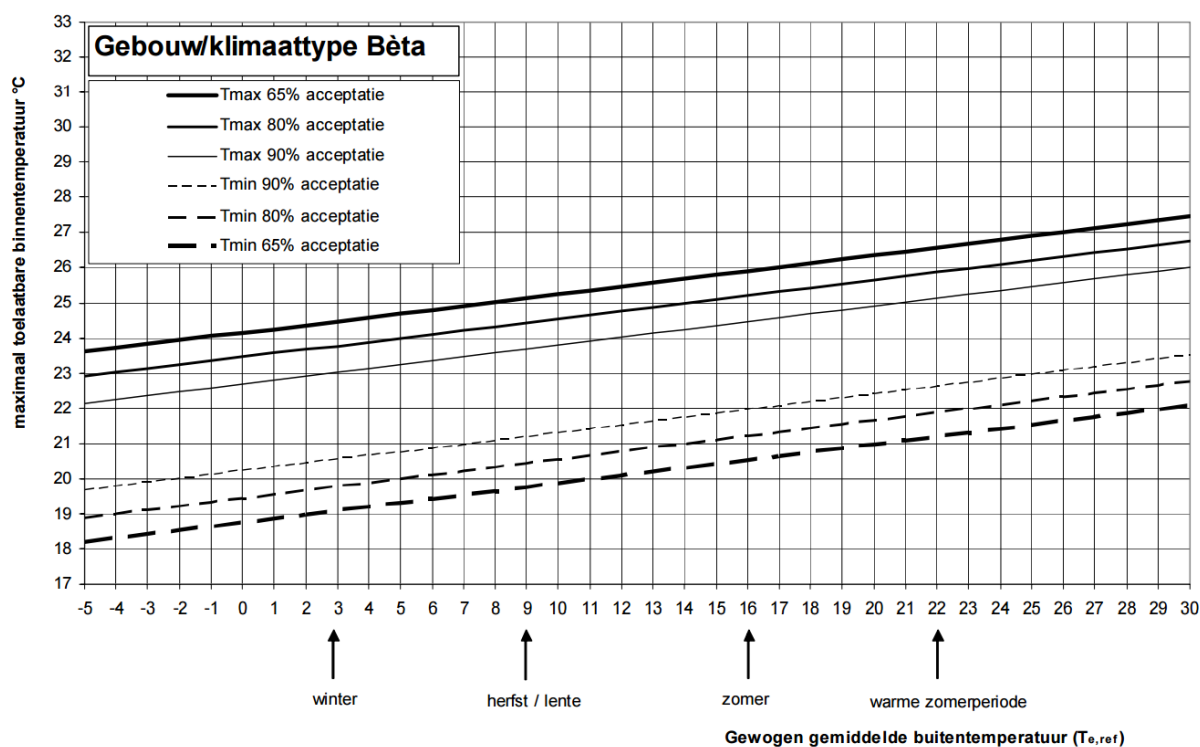
De methode Fanger wordt omschreven in NEN-EN-ISO 7730. Met deze methode kan voorspeld worden in hoeverre een gebouw als 'koud', 'neutraal' of 'warm' ervaren wordt door de gebruiker. Concluderend kan worden gesteld dat de methode Fanger niet van toepassing is in dit onderzoek omdat deze voornamelijk uitgaat van een op voorhand bepaalde ruimte. De methode GTO is als het ware een toevoeging op de methode Fanger waarbij rekening gehouden wordt met een acceptabele overschrijding naar aanleiding van een weegcriterium. De methode ATG richt zich meer op kantoor- en utiliteitsbouw, maar is gebaseerd op veldonderzoek. In tegenstelling tot de methoden Fanger en GTO die gebaseerd zijn op laboratorium onderzoek. In een veldonderzoek is aangetoond dat de methode Fanger een goede voorspelling doet voor de thermische behaaglijkheid als het aankomt op afgesloten ruimten met airconditioning. Echter voor natuurlijk geventileerde ruimten en passief gekoelde gebouwen blijken gebouwgebruikers een hogere tolerantie te accepteren bij hogere buitentemperaturen. Dit is tevens het gevolg van de mogelijkheid van het openen van ramen. Ook de vrijheid om kleding te veranderen speelt een rol bij een thermisch behaaglijk binnenklimaat. De methode ATG maakt onderscheid tussen 'alpha' en 'bèta' gebouwen, waarbij 'alpha' gebouwen natuurlijk geventileerd zijn en de 'bèta' gebouwen uitgaan van dichte gevels (Arbovakbase, 2015). Figuur 4 geeft een model weer waarmee men bepaalt of een gebouw als alpha of bèta gedefinieerd kan worden. Naar aanleiding van die definitie kan in de grafieken weergegeven in Figuur 5 en Figuur 6 de temperatuur bepaald worden voor het comfortabel binnenklimaat. Het verschil tussen het alpha en bèta gebouw is afhankelijk van de buitentemperatuur. Tot circa 11°C à 12°C is de grafiek van alpha hetzelfde als die van bèta. Boven deze temperaturen stijgt de behaaglijke binnentemperatuur van een alpha gebouw sneller ten opzichte van een bèta gebouw.



Figuur 4: Bepaling van het gebouw/klimaattype van een gebouw of ruimte, afhankelijk van de adaptatiemogelijkheden. Bron data; (van Beek, 2006).



Figuur 5: Gebouw/klimaatype Alpha. Maximaal toelaatbare operatieve binnentemperatuur voor een bepaalde acceptatie, afhankelijk van de buitentemperatuur $T_{e,ref}$. data bron Adaptieve temperatuurgrenswaarden (ATG), ISSO 74 (Beek, 2006).

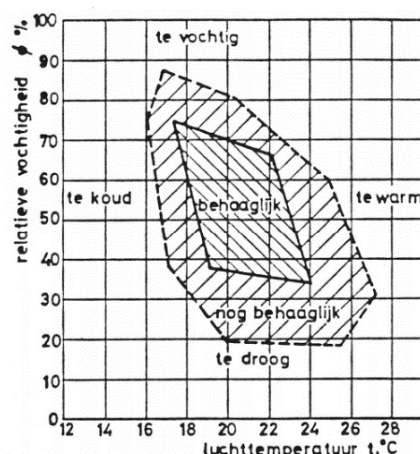


Figuur 6: Gebouw/klimaatype Bèta. Maximaal toelaatbare operatieve binnentemperatuur voor een bepaalde acceptatie, afhankelijk van de buitentemperatuur $T_{e,ref}$. data bron Adaptieve temperatuurgrenswaarden (ATG), ISSO 74 (Beek, 2006).

Een behaaglijke relatieve vochtigheid als gevolg van de temperaturen in het binnenklimaat is berekend door middel van het model van D.J. de Rotte (1992), dat is weergegeven in Figuur 7. Hierbij ontstaat er een behaaglijke relatieve vochtigheid verloop voor een alpha en bèta gebouw die zijn weergegeven in Tabel 12 en Tabel 13 in [subparagraaf 5.3.3.](#)

5.3. Klimaatsimulatie

Er dienen twee simulaties gedaan te worden binnen de testopstelling, waarbij het binnen- en buitenklimaat worden gesimuleerd. Tijdens deze simulatie is het van belang dat dit op jaarbasis (een cyclus van seizoenen) wordt uitgevoerd. Het is daarbij belangrijk dat de temperatuur, dampspanning en relatieve vochtigheid het juiste verloop heeft in beide klimaatkamers om een realistisch beeld van optredend vochttransport te krijgen.



5.3.1. Nulpunt

Het damptransport gebeurt constant, indien er een verschil in dampspanning aanwezig is. Dit betekent dat de verschillende dampspanningen altijd op zoek zijn naar een evenwicht/acclimatisatie (Stybenex; Engel, 2017). Volgens J. van den Engel (2017) dient dit nulpunt te worden gecreëerd door middel van een 'voorsimulatie'. In deze voorsimulatie wordt een klimaat gesimuleerd, waarbij de vochtigheid in het testmonster een evenwicht kan zoeken. Tijdens de voor-simulatie dienen de vochtsensoren in de gevel in de gaten gehouden te worden. Zodra de vochtigheid in de gevel constant is bij een constante binnen- en buitenklimaat, betekent dit dat het een evenwicht bereikt heeft. Hierna kan de verdere simulatie van start gaan waarbij het binnen- en buitenklimaat veranderd kunnen worden naar aanleiding van het gewenste simulatie programma. Omdat de test een dynamisch is kan er geen temperatuur en relatieve vochtigheid bepaald worden voor de voor-simulatie. Dit kan wel indien het startpunt van de simulatie bepaald is.

5.3.2. Externe simulatie

De externe simulatie weergegeven in Tabel 11 is gemaakt naar aanleiding van de gegevens afkomstig uit [paragraaf 5.2.](#) Deze externe simulatie is een algemeen voorbeeld en is gebaseerd op maandgemiddelde klimaatwaarden in Nederland. Indien er een specifieke locatie bepaald is kunnen deze waarden daarop worden aangepast.

	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Temperatuur [°C]	3,1	3,2	6,0	9,4	12,9	16,4	18,0	17,7	14,9	10,9	7,2	4,3
Dampdruk [hPa]	6,7	6,8	7,8	8,8	11,2	13,5	15,6	15,1	13,8	11,3	9,0	7,3
Relatieve vochtigheid [%]	88	85	83	77	76	78	78	79	84	86	89	90

Tabel 11: Externe simulatie m.b.v. maandgemiddelden in Nederland, bron data; KNMI

5.3.3. Interne simulatie

De maandgemiddelde temperaturen voor de interne simulatie is gemaakt naar aanleiding van het Adaptieve Temperatuur Grenswaarden (ATG) model (van Beek, 2006) en de maandgemiddelde waarden afkomstig van het KNMI (zie [paragraaf 5.2.](#) en [5.4.](#)). De maandgemiddelde relatieve vochtigheden voor de interne simulatie is gemaakt met behulp van het model; 'relatie luchttemperatuur en luchtvochtigheid' van

de Rotte (1992). Het ATG model richt zich op kantoorgebouwen en maakt een onderscheid tussen alpha en bèta gebouwen. Het verschil hiertussen zit hem in of er ramen open gezet en/of kledingstukken veranderd kunnen worden. Tot en met een buitentemperatuur van 12°C is de tolerantie op het binnenklimaat hetzelfde tussen alpha en bèta gebouwen. In Nederland leidt dit tot een verschil in de maanden mei tot en met september (zie Tabel 12 en Tabel 13).

Alpha	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Temperatuur [°C]	21,8	21,9	22,2	22,6	23,0	23,7	24,1	24,0	23,4	22,7	22,3	22,0
Relatieve vochtigheid [%]	51,5	51,0	49,0	47,0	42,0	35,0	34,0	34,5	38,0	45,0	48,0	51,0

Tabel 12: Maandgemiddelde binnentemperaturen en relatieve vochtigheden in alpha gebouwen.

Bèta	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Temperatuur [°C]	21,8	21,9	22,2	22,6	22,9	23,3	23,5	23,4	23,2	22,7	22,3	22,0
Relatieve vochtigheid [%]	51,5	51,0	49,0	47,0	42,5	37,5	38,5	38,0	40,0	45,0	48,0	51,0

Tabel 13: Maandgemiddelde binnentemperaturen en relatieve vochtigheden in bèta gebouwen.

5.3.4. Extreem klimaat simulatie

Buiten het jaargemiddelde is er altijd een kans aanwezig dat een extreem klimaat zich voordoet. Om garantie te kunnen bieden of de gevelconstructie voldoende kwaliteit biedt binnen deze omstandigheden dient dit ook gesimuleerd te worden. Extreme klimaten binnen Nederland vallen in dit onderzoek onder hitte- en koudegolven, die beide een werking hebben op het damptransport. Onder koud- en hittegolven in Nederland wordt verstaan:

"Het KNMI definieert een koudegolf als een aaneengesloten periode in De Bilt van minstens vijf ijsdagen (maximumtemperatuur lager dan 0,0 graden). Hiervan is op minstens drie dagen de minimumtemperatuur lager dan min 10,0 graden (strengte vorst)." - (Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut).

"In Nederland is officieel sprake van een hittegolf als de maximumtemperatuur bij het KNMI in De Bilt gedurende tenminste vijf dagen elke dag 25 graden of hoger is (zomerse dagen). Bovendien moet het in die vijf dagen op zeker drie dagen minstens 30 graden zijn (tropische dagen)." - (Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut).

Nader onderzoek naar de gegevens die het KNMI geeft op koud- en hittegolven is naar voren gekomen dat het voldoende is om de volgende simulaties te doen in het kader van extreme klimaten.

Koudegolven 10 dagen bij een temperatuur van -10°C

Hittegolven 10 dagen bij een temperatuur van 30°C

5.4. Thermohygrische eigenschappen

Om het vochttransport beter te begrijpen zijn de thermohygrische eigenschappen nader onderzocht en welke van toepassing bij vochttransport. Het woord thermohygrische is een samenstelling van de woorden 'thermo' en 'hygrisch' (oftewel hygro). Deze hebben de volgende betekenis.

Thermo- = "Ter vorming van woorden die betrekking hebben op heet of warm."
(Internationale woordenboek, 2017).

Hygrisch = gedrag in verband met luchtvochtigheid.
(Daidalos Peutz bouwfysisch ingenieursbureau, 2007).

Het woord 'thermohygrisch' heeft te maken met de relatie tussen warmte en de overdracht hiervan en luchtvochtigheid en het transport hiervan. Daarbij komen een aantal bouwfysische aspecten naar voren die van belang zijn binnen dit onderzoek. Het is belangrijk om te weten wat deze bouwfysische aspecten inhouden en hoe deze met elkaar in relatie staan. De hieronder genoemde termen zijn nader onderzocht, omdat deze vaak naar voren zijn gekomen tijdens het vooronderzoek van het theoretisch kader.

- Temperatuur
- Dampspanning
- Absolute luchtvochtigheid
- Relatieve luchtvochtigheid
- Dauwpunt
- Inwendige condensatie
- Dampdiffusie(weerstand)

5.4.1. Droge bol en natte bol temperatuur

Temperatuur kan op drie verschillende manieren worden genoteerd. In Nederland is dit graden Celsius. Het is belangrijk dat de verschillen met de andere eenheden in gedachten worden gehouden en dat hier geen fouten mee worden gemaakt. Tabel 14 toont de drie eenheden en hoe deze omgerekend kunnen worden.

Eenheid	Verbaal	Regio	Omvorming
°C	Graden Celsius	Worldwide except for countries using Fahrenheit.	$T_C = \frac{5}{9} (T_F - 32)$
°F	Graden Fahrenheit	U.S.A, Bahamas, Belize, Palau, Cayman Islands,	$T_F = \frac{5}{9} (T_C + 32)$
°K	Graden Kelvin	Eenhedenstelsel SI	0 °K = -273,15 °C (absolute nulpunt)

Tabel 14: Eenheden temperatuur

Tevens is er een verschil tussen droge bol temperatuur en natte bol temperatuur. Dit is de temperatuur die gemeten worden met een thermometer. De natte bol temperatuur wordt ook gemeten met een thermometer, echter wordt hier een 'kousje' om de voeler geplaatst die constant vochtig wordt gehouden met gedistilleerd of gedemineraliseerd water. Indien er geen sprake is van een verzadigde luchtvochtigheid, zal rondom de voeler water verdampen. Deze verdamping vergt warmte die uit de voeler wordt onttrokken, waardoor de temperatuur daalt (Uges). Een natte bol temperatuur is geschikt voor het meten van een nat oppervlak.

5.4.2. Dampspanning

De dampspanning is afhankelijk van de temperatuur en vluchtigheid van (vloeistof). De dampspanning van water kan op meerdere manieren worden berekend. Elke vergelijking berekend de dampspanning bij een bepaalde temperatuur. Er zitten kleine verschillen in de uitkomsten van de verschillende vergelijkingen. De verschillende vergelijking toont aan dat het berekenen van de dampspanning niet gemakkelijk is. In de bouwfysica wordt echter vaak de dampspanningstabel gebruikt die de verzadigde dampspanning weergeeft bij bepaalde temperaturen (zie bijlage I).

5.4.3. Absolute vochtigheid

Dit is de hoeveelheid waterdamp die zich in de lucht bevindt en wordt uitgedrukt in g/m^3 . Lucht met hogere temperaturen kan meer damp bevatten dan lucht met koudere temperaturen (Hendriks). Dit blijkt ook uit het Mollierdiagram en de dampspanningstabel (zie bijlage I).

5.4.4. Relatieve vochtigheid

Geeft aan hoeveel waterdamp zich werkelijk in de lucht bevindt ten opzichte van de maximale hoeveelheid waterdamp die de lucht kan bevatten. De relatieve luchtvochtigheid heeft in een binnenmilieu invloed op de beleving en behaaglijkheid. Deze beleving wordt in Nederland onderscheiden in vier klimaatklassen, waarbij 'klimaatklasse I' als 'droog' gezien wordt en 'klimaatklasse IV' als 'zeer nat'.

5.4.5. Dauwpunt

Het dauwpunt is de temperatuur waarin de lucht verzadigd is met waterdamp en deze niet kan worden vastgehouden. Dit vocht wordt omgezet naar zijn vloeibare fase (condensatie). Warme lucht kan meer vocht bevatten dan koude lucht. De afkoeling van lucht tot het dauwpunt, met een gelijkblijvende relatieve vochtigheid zorgt voor condensatie van overmatige vocht. Het veranderen van gas fase naar vloeibare fase wordt ook wel condensatie genoemd.

5.4.6. Inwendige condensatie

Condensatie ontstaat wanneer de werkelijke dampspanning gelijk is aan de maximale toelaatbare dampspanning, dat een gevolg is van de temperatuur. Hierbij is de relatieve luchtvochtigheid ook wel 100%, wat als gevolg heeft dat het overige waterdamp 'condenseert' (van gas- naar vloeibare fase veranderd). Dit gebeurt omdat de lucht verzadigd is en de waterdamp niet meer kan opnemen (Jong, 2013). Inwendige condensatie kan in een stationaire situatie worden berekend door middel van de Glaser methode (NEN-EN-ISO 13788, 2013). Deze methode is geschikt om extreme situaties uit te sluiten, omdat deze een relatief korte periode bezetten. Echter biedt het onvoldoende capaciteit om een dynamische berekening te maken zoals bij dampdiffusie open bouwen vereist is. Tegenwoordig worden computers gebruikt om dynamische modelberekeningen te maken, waarbij niet-stationaire situaties in mee kunnen worden genomen. Bij dampdiffusie open bouwen zijn dit;

- o Verandering van de weerstand tegen vochttransport in een bouw materiaal, als gevolg van het vochttransport;
- o Verandering van de hoeveelheid gecondenseerd vocht uit dampdiffusietransport als gevolg van uitdroging en herhaalde condensatie;
- o Verandering, hoewel tijdelijk, van de isolatiewaarde van een bouw materiaal als gevolg van condensatie.

Inwendige condensatie speelt een rol in deze testopstelling omdat dit kan voorkomen. Met dampopen bouwen zou dit opgelost moeten kunnen worden, doordat het vocht relatief snel afgevoerd kan worden. Het is daarom belangrijk om te weten hoe inwendige condensatie werkt, hoe dit gemeten en hoe dit berekend dient te worden.

5.4.7. Het Mollierdiagram

Het Mollierdiagram kan op meerdere manieren gelezen worden en daarmee kunnen verschillende waarden worden bepaald. De volgende gegevens kunnen onder andere van het Mollierdiagram worden afgelezen:

- o De absolute vochtigheid (AV) en de verzadigingsvochtigheid (VV)
- o De relatieve vochtigheid (RV) en het effect van RV-verandering
- o Het vochtdeficit
- o Het dauwpunt

Door middel van het Mollierdiagram kan voorspeld worden hoe bepaalde klimaten gesimuleerd kunnen worden. Het dient gebruikt te worden als begeleiding bij het maken van de simulaties. Temperatuur en luchtvochtigheid hebben een sterke relatie en invloed op elkaar. Deelonderzoek; meetmethodes en (meet)apparatuur gaat nader in op deze relatie in de praktijk.

5.4.8. Dampdiffusie(weerstand)

De dampdiffusieweerstand is de weerstand die een materiaal biedt tegen de hoeveelheid waterdamp dat zich door het materiaal wilt verplaatsen. Deze is tevens afhankelijk van de dikte van het materiaal. Het dampdiffusieweerstandsgetal (μ -waarde) is een constante waarde waarmee waterdamp door een materiaal beweegt, waarbij de dikte niet wordt meegerekend. De μd -waarde (S_d -waarde) is de waarde en wordt weergegeven in meters en wordt berekend door de μ -waarde te vermenigvuldigen met de dikte van het materiaal. De μd -waarde geeft de weerstand weer van een materiaal ten opzichte van de weerstand van lucht met dezelfde dikte.

Een μd -waarde van 20m geldt als sterk dampremmend (Bouwcentrum advies).

Een μd -waarde van 0,50m voor een enkel materiaal geldt als dampopen (Prinsen, 2015).

Volgens A. Tilmans en T. De Mets (2017) is een wand dampopen als de equivalente S_d -waarde kleiner is dan 3m.

5.5. Software

Er bestaan verschillende softwarepakketten om de thermohygrische prestaties te toetsen. Het rapport naar 'risico's van inwendige condensatie in een externe scheidingsconstructie' door S. Uittenbosch (2012) beschrijft dat Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC) een overzicht heeft gemaakt van hygrothermische modellen waarin 45 computermodellen zijn onderzocht. De verschillende software werkt op verschillende wijzen. Zo zijn sommige software alleen geschikt om 1 of 2 dimensionale berekeningen uit te voeren, terwijl de nieuwere software ook in staat is om 3 dimensionaal te berekenen.

In de software pakketten zijn de thermohygrische eigenschappen vaak al verwerkt. Het is daarom niet nodig om zelf berekeningen te maken. Tevens is het niet mogelijk om dit handmatig te berekenen, omdat dampdiffusie open bouwen het gebruik van dynamische berekeningen vereist en dit is uitsluitend uitvoerbaar door middel van computersoftware. Software voor het voorspellen van het vochttransport is niet nodig bij het testen, echter kan de testopstelling wel gebruikt worden om de software controleren op correctheid. Concluderend kan worden gesteld dat het 3D simuleren van het vochttransport niet nodig is binnen deze testopstelling en is een 1D of 2D simulatie voldoende voor deze testopstelling.

5.6. Wet- en regelgeving

5.6.1. Bouwbesluit

Het Nederlandse bouwbesluit (2011) geeft geen wet- & regelgeving dat eisen stelt aan dampdiffusie open bouwen of het testen van dampdiffusie open gevelconstructies. Wel is er overige wet- en regelgeving die invloed heeft bij het samenstellen van een gevel. Hier dient dan ook te allen tijde rekening mee gehouden te worden.

5.6.2. Koninklijke Nederlandse Normalisatie-instituut

Er zijn geen normen die dampdiffusie open bouwen behandelen. Wel zijn er normen die de bepaling van de dampdiffusieweerstandsgetal (μ -waarde) beschrijven. Deze normen betreffen het bepalen van de

‘waterdampdoorlatendheid’ van een materiaal (zie Tabel 15). Er zijn meerdere normen waarmee de μ -waarde van een specifiek materiaal bepaald kan worden. NEN-EN-ISO 12572 en NEN-ISO 21129 zijn specifiek bedoeld om de dampdiffusieweerstandsgetal van bouwmaterialen te bepalen. Het principe bij het bepalen van de μ -waarde is in elke norm hetzelfde. Deze gaat uit van de ‘natte beker methode’, waarbij er een ruimte (beker) wordt gemaakt waar vloeistof (zoutoplossing) in gaat. De ruimte wordt afgedekt met het testmonster die vervolgens volledig wordt afgesloten. Deze afsluiting kan op verschillende manieren worden uitgevoerd en is afhankelijk van de grootte van het materiaal. Dit onderzoek betreft het ontwikkelen van een testopstelling voor het testen van dampdiffusie open gevelconstructies, waarbij materialen worden toegepast met een lage dampdiffusieweerstand. NEN-ISO 21129 (box methode) geeft aan dat deze norm geschikt is voor het bepalen van het dampdiffusieweerstandsgetal (μ -waarde) van materialen met een lage dampdiffusieweerstand.

NEN-EN	772-15	:2000 en	Beproevingmethoden voor metselstenen - Deel 15: Bepaling van de waterdampdoorlatendheid van cellenbeton
NEN-EN	1015-19	:1998/A1:2014 en	Beproevingmethoden voor mortel voor metselwerk - Deel 19: Bepaling van waterdampdoorlatendheid van verharde pleistermortels
NEN-EN	1931	:2000 en	Flexibele banen voor waterafdichtingen - Bitumen, kunststof en rubber banen voor waterafdichtingen voor daken - Bepaling van de eigenschappen van waterdampdoorlatendheid
NEN-ISO	2528	:1996 en	Materialen in vellen - Bepaling van de waterdampdoorlatendheid - Gravimetrische (schotel) methode
NEN-EN-ISO	7783	:2011 en	Verven en vernissen - Bepaling van eigenschappen van waterdampdoorlatendheid - Kroesmethode
NEN-EN	12086	:2013 en	Materialen voor de thermische isolatie van gebouwen - Bepaling van de waterdamp-doorlatendheidseigenschappen.
NEN-EN-ISO	12572	:2016 en	Vochteigenschappen van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van de waterdampdoorlatendheid - Bekermethode
NEN-ISO	21129	:2007 en	Hygrothermische prestatie van bouwmaterialen en producten - Bepaling van de waterdoorlatendheid - Boxmethode.

Tabel 15: Normen in het kader van waterdampdoorlatendheid per materiaal.

Bij het testen van de dampdoorlatendheid bij dampopen materialen kan volgens NEN-EN-ISO 12572 beter gedistilleerd water worden gebruikt, omdat dit voor 100% relatieve vochtigheid zorgt. Het hoge damptransport zorgt ervoor dat condensatie wordt voorkomen, wat bij materialen met een hoge dampdiffusieweerstand wel een risico is. Echter wordt in de testopstelling gebruik gemaakt van gevarieerde relatieve vochtigheden en er is daarom geen voorkeur voor gedistilleerd water noch voor zoutoplossingen. Wel kunnen zoutoplossingen een nadelig effect hebben op de testopstelling in verband met corrosie.

[Paragraaf 5.2](#) omschrijft hoe het klimaat voor de klimaatkamer simulaties bepaald kan worden. Indien er besloten is zelf metingen uit te voeren op locatie voor zowel het externe als interne klimaat kan gebruik gemaakt worden van de volgende normen:

NEN-EN-ISO	7726	:2001 en	Ergonomie van de thermische omgeving - Instrumenten voor het meten van fysische grootheden
NEN-EN-ISO	7730	:2005	Klimaatomstandigheden - Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid
NEN-EN-ISO	15927	Deel 1	Hygro-thermische eigenschappen van gebouwen - Berekening en weergave van klimatologische gegevens.

Tabel 16: Normen met betrekking tot het vaststellen van het klimaat.

5.7. Vergelijkbare meetmethoden

Volgens het rapport 'Use of an environmental chamber to investigate large-scale envelope specimen hygrothermal performance' (Derome, Fazio, Anthientis, & Rao) is het mogelijk hygrosensoren te plaatsen in het testmonster, echter is het nog wel discutabel of de metingen betrouwbaar zijn. Hierbij is het tevens van belang dat de hygrosensoren de juiste minimale afmetingen hebben om geplaatst te kunnen worden in het isolatiemateriaal of tussen de gevel lagen. In [subparagraaf 5.8.1](#) is omschreven dat deze hygrosensoren beschikbaar zijn. Tevens is het van belang om te weten wat de vochtigheid is in houtconstructies. Vochtpercentage hoger dan 21% zijn risicovol voor houtproducten, waarbij houtrot kan optreden. Derome, Fazio, Anthientis, & Rao omschreven dat zij het vochtgehalte hebben gemonitord in de materialen, waaronder hout, door middel van vochtgehalte sensoren. Als derde optie hebben zij een monster genomen om met een aparte testmethode het exacte vochtgehalte te meten. Er zijn meerdere methoden om deze meting uit te voeren. Vanwege het feit dat het een testopstelling betreft dient er geen meting op locatie plaats te vinden, wat betekend dat de infrarood droogtechniek en CM-meting geen toegevoegde waarde hebben ten opzichte van dit onderzoek. Tevens is de nauwkeurigheid van de Darr-methode hoger waardoor dit de meeste geschikte methode om het vochtgehalte te testen in genomen monsters. Deze methode dient naderhand uitgevoerd te worden en is bedoeld om het vochtgehalte te bepalen na een volledige cyclus van seizoenen in de testopstelling.

5.8. Meetapparatuur

Volgens D. Remans, Laboratorium manager TNO (2017), dient de temperatuur gemeten te worden bij zowel de in- als uitvoer van de klimaatkamers, als er verwarmd wordt door middel van lucht. Ook zegt D. Remans dat er geen of weinig verse lucht wordt toegevoegd maar dat lucht vaak wordt rondgecirculeerd. P. Best, project manager R&B Scheldebouw (2017), vermeldt dat de lucht in de klimaatkamers bij Scheldebouw ook wordt gecirculeerd. Dit is een methode om ruimtes sneller te kunnen verwarmen, omdat de verwarmde lucht in de klimaatkamer wordt afgezogen om vervolgens verder te verwarmen. Deze wordt dan weer terug de klimaatkamer in geblazen, waarna dit proces zich herhaalt. Het is hierbij belangrijk dat de lucht boven in de ruimte wordt afgezogen en onderin wordt ingeblazen. Om de temperatuur en relatieve vochtigheid te meten dienen bijhorende sensoren geplaatst te worden op de locaties weergegeven in Tabel 17.

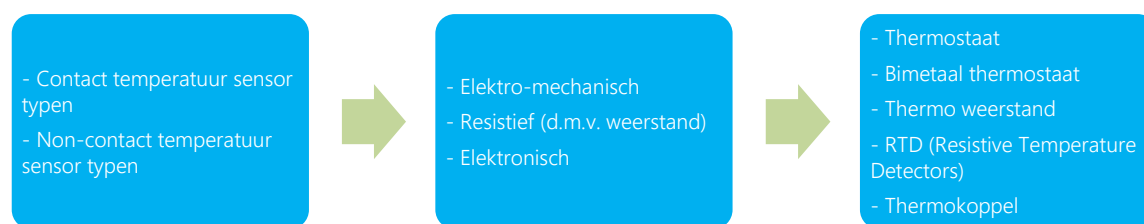
	Klimaatkamer 'binnen'		Klimaatkamer 'buiten'		Gevel (monster) Tussen lagen	Gevel in 'dikke' lagen (indien mogelijk)	Sensor
	invoer	uitvoer	invoer	uitvoer			
Temperatuur [°C]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Thermo-sensor
Relatieve vochtigheid [%]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Hygro-sensor

Tabel 17: Locaties sensoren

5.8.1. Thermosensoren

De randvoorwaarden voor thermosensoren binnen dit onderzoek is dat zij een temperatuurbereik hebben van -15°C tot en met 40°C. Thermosensoren zijn vaak gekoppeld met hygrosensoren tot één sensor. Voor het monitoren van de temperatuur en vochtigheid in het testmonster is het daarom gunstig om de gekoppelde (2 in 1) sensor toe te passen. Er bestaan vele soorten thermosensoren die allemaal via een

verschillend principe werken. Er zijn twee soorten sensoren die onderverdeeld zijn in 3 groepen die vervolgens weer onderverdeeld zijn in vijf sensor principes (zie Figuur 8). Vanwege een beperkte deskundigheid is er besloten om geen uitspraak te doen over deze thermosensoren. Het is aanbevolen om dit door een deskundige nader te laten onderzoeken.



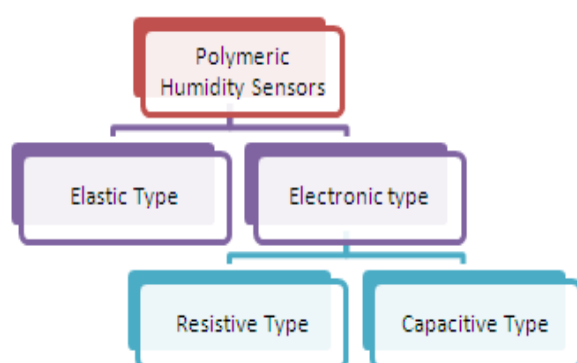
Figuur 8: Typen sensoren

5.8.2. Hygrosensoren

Volgens P. Jain (2012) bestaan er twee type vochtigheid sensoren; relatieve vochtigheid sensoren en absolute vochtigheid sensoren. De meeste absolute vochtigheid sensoren zijn ook relatieve vochtigheid sensoren, maar kunnen volgens verschillende principes waarnemen. Uit Tabel 18 is te concluderen dat capacitieve sensoren nauwkeuriger zijn in hun waarnemingen dan de overige hygrosensoren. Van de capacitieve sensoren is de 'Thermo-set; Polymeer' hygrosensor het meest nauwkeurig. Capacitieve hygrosensoren zijn samen met resistieve hygrosensoren onderdeel van elektronische typen die tevens, samen met elastische typen, weer onderdeel is van polymerische hygrosensoren (zie Figuur 9).

Er zijn meerdere manieren om de vochtigheid te meten. Echter is hier uitsluitend aandacht gegeven op hygrosensoren in het kader van het monitoren van de vochtigheid in het testmonster.

De vorm van de hygrosensoren zijn relatief plat en klein. Dit is gunstig omdat deze sensoren tussen de lagen van het testmonster geplaatst kunnen worden. Deze dienen wel gekoppeld te worden aan een datalogger en/of computer om een signaal door te kunnen geven. Er kan geconcludeerd worden dat er hygrosensoren bestaan die de geschikte afmetingen hebben om toegepast te worden in het testmonster. Deze hygrosensoren voldoen in principe aan de eis voor het relatieve vochtigheidsbereik (10% tot en met 95%) dat gesteld is in dit onderzoek. Volgens het rapport 'Use of an environmental chamber to investigate large-scale envelope specimen hygrothermal performance' (Derome, Fazio, Anthientis, & Rao) is het mogelijk hygrosensoren te plaatsen in het testmonster, echter is het nog discutabel of deze metingen betrouwbaar zijn. De mogelijkheid is aanwezig, maar vanwege een beperkte deskundigheid is er besloten om geen aanbeveling te doen over deze hygrosensoren. Het is aanbevolen om dit door een deskundige nader te laten onderzoeken.



Figuur 9: Polymerische hygro sensoren, bron data; (Jain, 2012).

Active Material	Thermo-set Polymer	Thermoplastic Polymer	Thermoplastic Polymer	Bulk Thermoplastic	Bulk AlO ₃	Lithium Chloride Film
Substrate	Ceramic or Silicon	Ceramic or silicon	Polyester or mylar film	N/A	N/A	Ceramic
Sensed Parameter	Capacitance	Capacitance	Capacitance	Resistance	Resistance	Conductivity
Measured Parameter	%RH	%RH	%RH	%RH	%RH	%RH
RH Change	0% to 100%	0% to 100%	0% to 100%	20% to 100%	2% to 90%	15% to <100%
RH Accuracy	±1% to ±5%	±3% to ±5%	±3% to ±5%	±3% to ±10%	±1% to ±5%	±5%
Interchangability	±2% to ±10% RH	±3% to ±20% RH	±3% to ±20% RH	±5% to ±25% RH	poor	±3% to ±10% RH
Hysteresis	<1% to 3% RH	2% to 5% RH	2% to 5% RH	3% to 6% RH	<2% RH	very poor
Linearity	±1% RH	±1% RH	±2% RH	poor	poor	Very poor
Risetime	15 s to 60 s	15 s to 90 s	15 s to 90 s	2 min to 5 min	3 min to 5 min	3 min to 5 min
Temperature Range	-40 °C to 185 °C	-30 °C to 190 °C	-25°C to 100 °C	10 °C to 40 °C	-10 °C to 75 °C	-
Long Term Stability	±1%RH/5 yr	±1%RH/yr	±1%RH/yr	±3%RH/yr	±3% RH/yr	>1% RH/°C

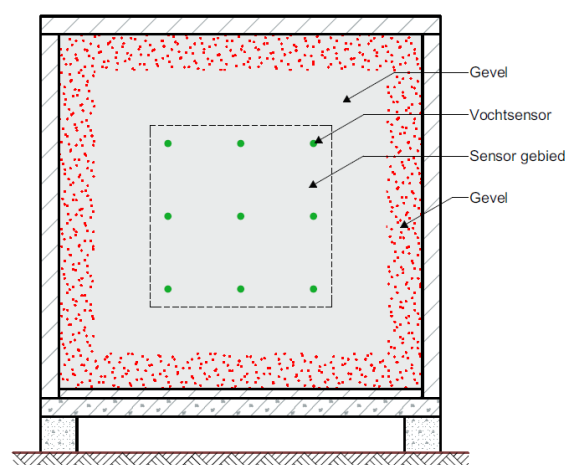
Tabel 18: Parameters bij de verschillende typen absolute vochtigheid sensoren; bron data (Jain, 2012).

5.8.3. Randeffecten

Om betrouwbare metingen te kunnen doen is het cruciaal dat de sensoren op de juiste positie geplaatst worden. Hierbij is het van belang dat 'randeffecten' worden uitgesloten omdat deze invloed kunnen hebben op de sensoren.

Randeffecten zijn de effecten die aan de rand spelen met betrekking tot onder andere warmteoverdracht.

Figuur 10 toont een doorsnede van het schetsconcept van de testopstelling. Hierin stellen de rode stippen het gebied voor waar de randeffecten zich voordoen en het grijze gebied toont een aanzicht van het testmonster (gevel). De aansluiting van het testmonster op de wanden en dak van de testopstelling zorgt voor de randeffecten. De warmteoverdracht die lineair door het testmonster gaat is nagenoeg constant, maar vanwege de aansluiting op de testopstelling wordt deze beïnvloed. Dit gebeurt omdat warmte via de randen deels wordt afgegeven aan de constructie van de testopstelling. Indien er sensoren in het randeffecten-gebied worden geplaatst zullen de waarden voor vochtigheid veranderen aangezien de vochtigheid een gevolg is van de heersende temperatuur. In Figuur 10 wordt ook het gebied getoond waarin de sensoren geplaatst dienen te worden. Dit gebied is centraal in het testmonster geplaatst om deze randeffecten de kunnen vermijden. De groene stippen zijn een indicatie van de sensoren en zeggen niet dat de sensoren ook zodanig geplaatst dienen te worden. Wel wordt aangeraden de sensoren langs de rand en centraal van het 'sensor-gebied' te plaatsen om eventuele verschillen hierin op te merken. Een minimaal van negen sensoren, zoals in Figuur 10 is weergegeven, is verplicht om een duidelijk beeld te krijgen van het thermohygrisch gedrag in het testmonster.



5.9. Klimaatregeling

5.9.1. Verwarmings- en koelingsapparatuur

Er zijn meerdere manieren om het klimaat te regelen binnen de testopstelling. Figuur 11 geeft enkele mogelijkheden weer bij het verwarmen en koelen van de lucht. Dit kan gedaan worden door middel van luchttransport of straling. Verwarmingsapparatuur kan onderverdeeld worden in elektrische of brandstofverwarming. Aterno (2013) beweert dat het voordeel van elektrische verwarming ligt in het onderhoud. Tevens is een elektrische netwerkaansluiting gemakkelijker te realiseren in vergelijking met een brandstofaansluiting. Brandstofverwarming dienen ook regelmatig bijgevuld te worden, maar zijn relatief goedkoper dan elektriciteit. Een groot nadeel van brandstofverwarming is dat deze een afvoer nodig hebben.

	Verwarmen	Koelen
Luchttransport	Elektrische verwarming Brandstof verwarming (diesel, olie, gas)	Airconditioning Luchtkoeler
Straling	Klimaatmat Radiator	Klimaatmat

Figuur 11: verwarmings- en koelingsmethoden

Uit gesprek met deskundigen op het gebied van klimaatkamer en installatietechniek is naar voren gekomen dat installatie bedrijven de volledige installatie uitvoeren. Dhr. H. Punte, werkende bij Colpro B.V. (2017) en dhr. A. Liefbroer, werkende bij Klima-testtechniek (2017) hebben beide aangegeven de gewenste testopstelling in het kader van dit onderzoek te kunnen realiseren. Dhr. A. Liefbroer heeft hierbij aangegeven dat dit een bestaande testopstelling is, bekend als een Hot Box testopstelling. Vanwege een beperkte deskundigheid is er besloten om geen uitspraak te doen over de verwarmings- en koelingsinstallatie. Het is aanbevolen om dit door een deskundige nader te laten onderzoeken. Tevens wordt aanbevolen om met een installatiebedrijf aan tafel te gaan om tot een gunstige oplossing te komen, omdat zij vaak in staat zijn de volledige klimaatapparatuur te installeren.

5.9.2. Bevochtigings en ontvochtigingsapparatuur

"Men kan de dampdruk in een afgesloten hoeveelheid lucht bij gelijkblijvende temperatuur verhogen door waterdamp toe te voegen." - (Buishand & Velds).

"Uitgaande van onverzadigde lucht kan verzadiging worden bereikt door waterdamp toe te voegen bij gelijkblijvende temperatuur of door de temperatuur te verlagen bij gelijkblijvende dampdruk." - (Buishand & Velds)

Uit de uitspraken door Buishand en Velds kan worden geconcludeerd dat door waterdamp toe te voegen in een gesloten ruimte de dampdruk verhoogd kan worden. Dhr. P. Best, project manager R&D bij Scheldebouw (2017), zegt dat de vochtigheid binnen een klimaatkamer verhoogd kan worden door damp toe te voegen aan de ruimte. Ook volgens dhr. D. Remans, Laboratorium manager TNO (2017), kan de relatieve vochtigheid worden geregeld door stoombevochtigers in de klimaatinstallatie te plaatsen. Water wordt in deze stroombevochtiger verhit tot het verdampt en kan samen met de lucht te klimaatkamer in geblazen worden. Hieronder volgt een lijst van mogelijkheden voor het bevochtigen van de klimaatkamers:

- Verneveling onder hoge of lage druk,
- Ultrasoon & infrasoone verdampingsproces,
- Koudverdampingsproces,
- Luchtwater
- Elektrische stoom,
- Gas gestookte stoom.

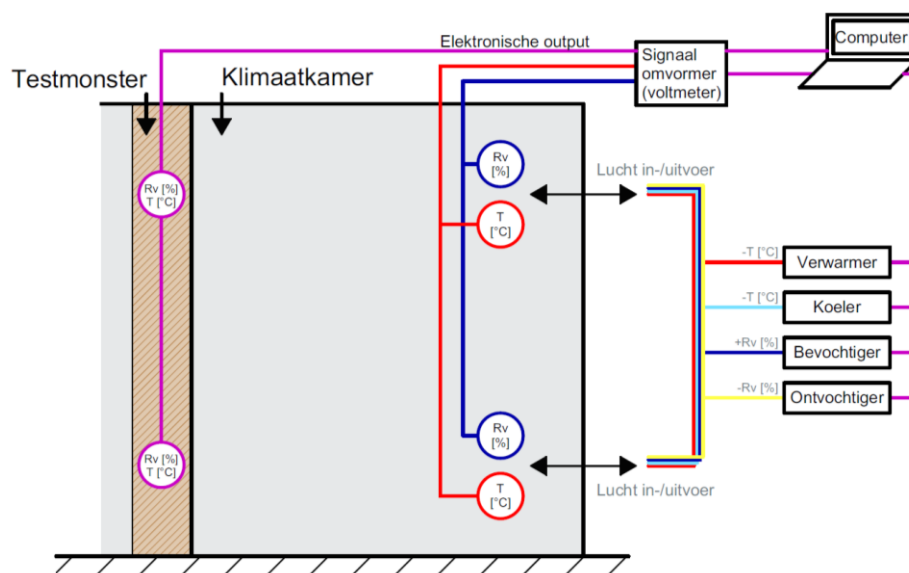
Sommige bevochtigingsmethoden zijn uit te voeren als adiabatisch. Adiabatisch betekent letterlijk 'niet diabatisch'. Adiabatisch bevochtigen houdt in dat de lucht wordt bevochtigd met water, waarbij geen warmtewisseling is met de omgeving.

"Een adiabatisch proces, is een proces waarbij geen uitwisseling van warmte met de omgeving plaats vindt." - (Uges)

Een adiabatisch proces kan gunstig zijn met betrekking tot de opstelling als gevolg van dit onderzoek, omdat hierbij kan worden bevochtigd zonder dat er een warmtewisseling plaatsvindt. De verandering van het ene aspect heeft vaak invloed op het ander. Door de dynamische temperatuur- en relatieve vochtigheidswisselingen in de test is het gunstig dat deze twee aspecten los van elkaar veranderd kunnen worden. Naar aanleiding van deze kennis is geconcludeerd dat het gunstig is om een adiabatische bevochtigingsinstallatie toe te passen. Echter vanwege beperkte deskundigheid en tijd is het aanbevolen om dit nader te bespreken met deskundigen.

5.9.3. Apparatuur aansluiting

De gegevens die waargenomen worden door de thermo- en hygrosensoren dienen doorgegeven te worden aan een datalogger en/of computer. Volgens de website van Pedak worden bij veel dataloggers de software gratis bijgeleverd. Op de website van Trotec wordt aangegeven dat zij de analyse- en beheers software bij elk product meeleveren. De datalogger dient in deze testopstelling de temperatuur, relatieve vochtigheid en mogelijk dampspanning op te slaan. Tabel 12 toont een schematische weergave van het principe van hoe de apparatuur in de testopstelling aangesloten dient te worden. In deze apparatuur aansluiting gaat het om de klimaatkamerregeling. De sensoren die zich in het testmonster bevinden dienen alleen gegevens door te geven aan een datalogger en/of computer, maar hebben geen gevolg op de klimaatinstallaties. Zoals eerder genoemd is het van belang dat binnen de klimaatregeling de signalen van de sensoren worden opgeslagen in een datalogger en/of computer. Als gevolg van deze signalen dient de computer de apparatuur aan te sturen indien nodig. De apparatuur verwarmt, koelt, bevochtigt of ontvochtigt de klimaatkamers, waarna de sensoren deze veranderingen weer waarnemen en als signaal doorgeven aan de datalogger en/of computer. De kennis over dit onderwerp is beperkt en wordt daarom niet verder uitgewerkt. Wel wordt de opdrachtgever aanbevolen dit een deskundige nader te onderzoeken.



Figuur 12: Het schematisch principe van apparatuur aansluiting in de testopstelling.

5.9.4. Het Molliediagram in praktijk

Het artikel 'Het Molliediagram in theorie en praktijk' dat geschreven is door Uges in het vaktijdschrift 'Koude & luchtbehandeling', behandelt de aspecten; verwarmen, bevochtigen, ontvochtigen en koelen in relatie tot het Molliediagram.

Verwarmen

Verwarmen is een aspect dat in de praktijk net zo werkt als dat in het Molliediagram is aangegeven. Verwarmen wordt in het Molliediagram aangegeven met een rechte lijn naar boven, waarbij de relatieve vochtigheid daalt. In de praktijk is het hierbij wel belangrijk dat er geen andere lucht, met mogelijk een andere relatieve vochtigheid wordt toegevoegd. Het gaat hier dan om het verwarmen van de aanwezige lucht. In de klimaatkamers van de testopstelling is het daarom belangrijk dat als er verwarmt wordt er rekening gehouden wordt dat de relatieve vochtigheid mee verandert. De relatieve vochtigheid dient dan, indien nodig, ook aangepast te worden naar aanleiding van vooraf bepaalde simulatiewaarden.

Bevochtigen met water of stoom

Bij bevochtigen met water of stoom wordt vocht aan de droge lucht toegevoegd in de vorm van verdamping. Een adiabatische verzadiging speelt hierbij een belangrijk rol. [Subparagraaf 5.9.2.](#) omschrijft wat 'adiabatisch' inhoud. Uges beschrijft een voorbeeld dat hieronder is weergegeven, waarbij er waterdamp aan droge lucht wordt toegevoegd. De temperatuur van het toe te voegen vocht speelt hierbij een belangrijke rol. Om de juiste simulaties in de klimaatkamers te kunnen simuleren dient rekening gehouden te worden met het feit dat de temperatuur kan veranderen bij het toevoegen van waterdamp aan de lucht. De temperatuur dient dan, indien nodig, ook aangepast te worden naar aanleiding van vooraf bepaalde simulatiewaarden.

Verwarmen en tegelijk bevochtigen

Indien er verwarmd wordt daalt de relatieve vochtigheid. Zodra en wordt bevochtigd kan de temperatuur zowel stijgen als dalen, afhankelijk van de temperatuur van de toegevoegde damp. Deze twee activiteiten dienen daarom goed op elkaar te worden afgestemd om de juiste waarden te krijgen in de klimaatkamers.

Ontvochtiging

"Ontvochtiging treedt op zodra de oppervlakte temperatuur van de koeler lager is dan het dauwpunt van de er langs stromende lucht." - (Uges)

Op de horizontale as van het Molliediagram kan worden afgelezen tot in hoeverre er wordt ontvochtigd bij een gelijkblijvende temperatuur. Uges zegt dat er wordt ontvochtigd als de oppervlakte temperatuur van de koeler lager ligt dan het dauwpunt van de er langs stromende lucht. Dit houdt in dat er automatisch ook gekoeld wordt bij ontvochtigen. Indien een bepaalde temperatuur behouden wenst te worden, maar er wel ontvochtigd dient te worden zal de lucht weer bijgesteld moeten worden voordat deze terug de klimaatkamer ingestuurd wordt. Hiervoor dient een juiste berekening te worden gedaan, omdat zodra er verwarmd wordt de relatieve vochtigheid ook mee verandert. Indien er niet ontvochtigd wenst te worden moet de temperatuur van de koeler boven het dauwpunt van de er langs stromende lucht liggen. Uges beweert dat installaties die gebruik maken van een DX-systeem nagenoeg altijd ontvochtigen. Indien water wordt gebruikt als koudedragers is het goed mogelijk de oppervlakte temperatuur boven het dauwpunt te houden. Plafondkoeling en Dauwpuntkoeling zijn voorbeelden hiervan.

5.10. Parameters

Het is van belang op voorhand te bepalen welke parameters er meegerekend worden in het uitvoeren van de testen. Zo zijn er bepaalde parameters die altijd meegerekend dienen te worden zoals; temperatuur, relatieve vochtigheid, dampdiffusie, inwendige condensatie. Andere parameters zijn afhankelijk van de gevel die getest gaat worden. Hier is van belang om op voorhand te bepalen of de volgende parameters meegenomen dienen te worden;

- Vochtgehalte hout
- Luchtlekken
- Wind en zonlicht
- Dag en nacht
- Randeffecten en koudebruggen

5.11. Randvoorwaarden testopstelling

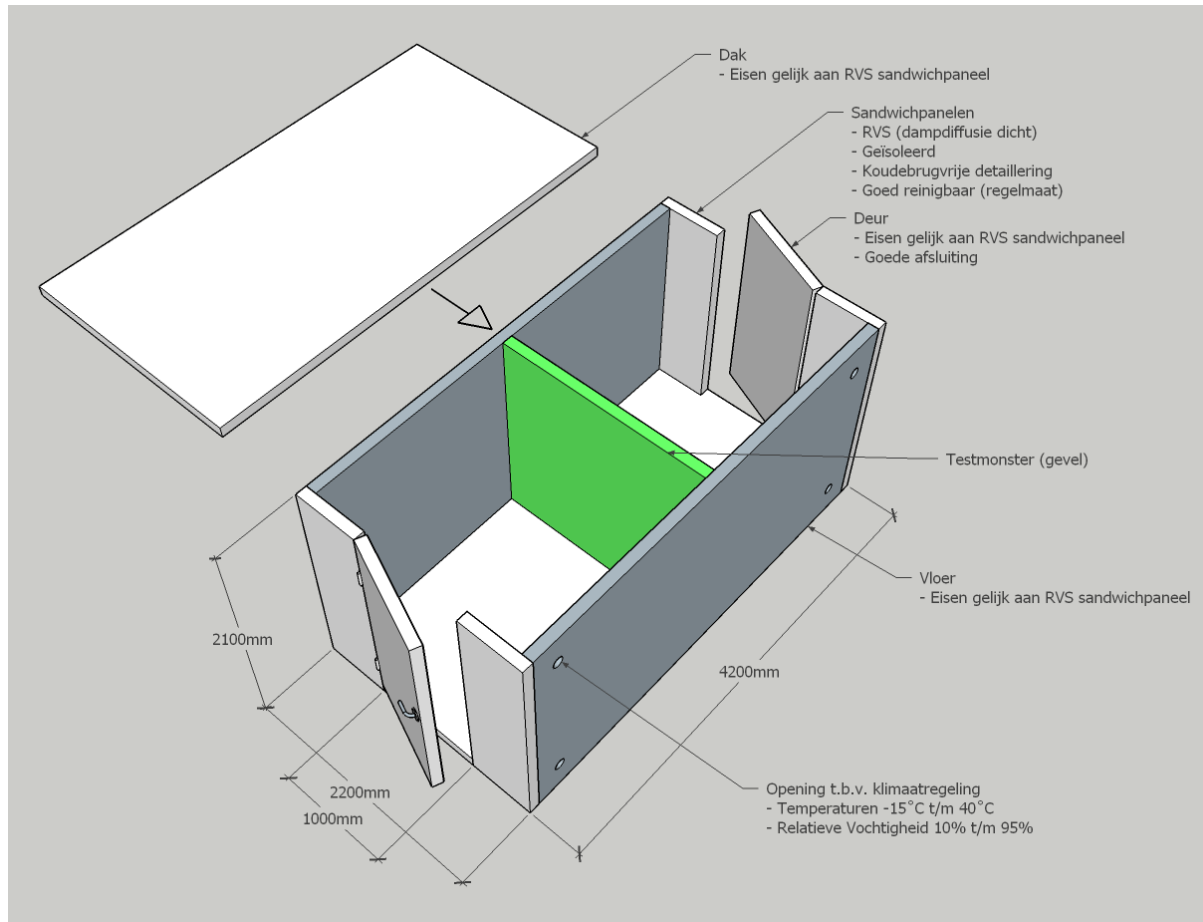
Naar aanleiding van de gevonden informatie op wat dampdiffusie inhoudt en hoe dit getest kan worden is een schetsconcept ontworpen die dient te voldoen aan de hieronder genoemde randvoorwaarden.

- Twee gekoppelde klimaatkamer.
- Testmonster (gevel) tussen klimaatkamer.
- Elke klimaatkamer een eigen klimaatregeling.
- Klimaatregeling monitoren en regelen op; temperatuur, relatieve vochtigheid en dampspanning.
- Klimaatkamers dampdicht uitvoeren.
- Klimaatkamers luchtdicht uitvoeren.
- Klimaatkamers geïsoleerd uitvoeren.
- Aansluitingen koudebrug vrij uitvoeren.
- Temperatuur van -15°C tot 40°C.
- Relatieve vochtigheid van 10% tot 95%.
- Simulatie dient uitgevoerd te worden op basis van een 'seizoen-cyclus' (1 jaar). Dit betekent niet dat de tijdperiode van de test een jaar dient te bedragen.

Naar aanleiding van een schetsconcept is nader onderzocht hoe dit uitgevoerd kan worden in een praktische toepassing. Hierbij is contact gelegd met deskundigen, waaruit de volgende randvoorwaarden naar voren zijn gekomen. Deze randvoorwaarden zijn gecombineerd en samen hebben deze geleidt tot een schetsontwerp die is weergegeven in Figuur 13.

- Afwerking elementen is uitgevoerd in minimaal RVS-304 of RVS-316 (roestvaststaal) in verband met dampdicht zijn.
- Afwerking elementen is glad in verband met reinigbaarheid.
- Afwerking van wanden, plafond en vloer is bestendig tegen corrosie als gevolg van hoge relatieve vochtigheden. Dit kan eventueel opgelost worden door middel van een coating. Corrosieklasse C2, naar aanleiding van NEN-EN-ISO 12944-2; Verven en vernissen - Bescherming van staalconstructies tegen corrosie door middel van verfsystemen - Deel 2: Indeling van belastingsklassen, is voldoende met betrekking tot dit onderzoek.
- Gelaste naden worden aanbevolen boven kitnaden in verband met dampdiffusiedichtheid.
- Testopstelling dient 'inloopbaar' te zijn.

- Testmonster dient relatief groot van oppervlak te zijn om realistische representatieve waarden uit de metingen te kunnen waarnemen. In verband met de inloopbaarheid en uniformiteit van de metingen dient het testmonster een oppervlakte te hebben van minimaal 2×2 m.
- Testopstelling dient los van de vloer te staan om warmteoverdracht met de onderliggende vloer te minimaliseren.



Figuur 13: Schetsontwerp

5.12. Hot Box methode

In verband met de randvoorwaarden en verkregen informatie, door contact met deskundigen, is er een bestaande testopstelling die vele overeenkomsten heeft met de gewenste testopstelling. Die betreft de Hot Box methode die tevens onder te verdelen is in een Guarded Hot Box en een Calibrated Hot Box. Dit wordt omschreven in de ASTM C1363 (1997). De bron gebruikt voor deze informatie is de ASTM C1363-97, omdat deze bron volledig beschikbaar is. Momenteel is er een versie die opgesteld is in 2011 en deze bevat verschillen met die uit 1997, echter het principe van de testopstelling is hetzelfde. De twee methoden zijn beide opgebouwd uit twee klimaatkamers genaamd de 'Hot Box' (links) en de 'Cold Box', die tevens gekoppeld kunnen worden. Tussen deze klimaatkamers kan in een frame een testmonster geplaatst worden. In beide klimaatkamers kan een apart van elkaar, een klimaatsituatie worden gesimuleerd. Het verschil tussen deze simulaties zorgt voor een warmteoverdracht en vochttransport door het testmonster. Het verschil tussen de Guarded Hot Box en de Calibrated Hot Box is dat in de Guarded Hot Box een

genaamde 'Metering Box' in de Hot Box geplaatst wordt om metingen te doen (zie Figuur 14). Deze Metering box is geschermd door de 'Guarded Chamber'. De Guarded Chamber zorgt ervoor dat het klimaat in de Metering Box niet sterk veranderd, om zo betrouwbare metingen te kunnen doen.

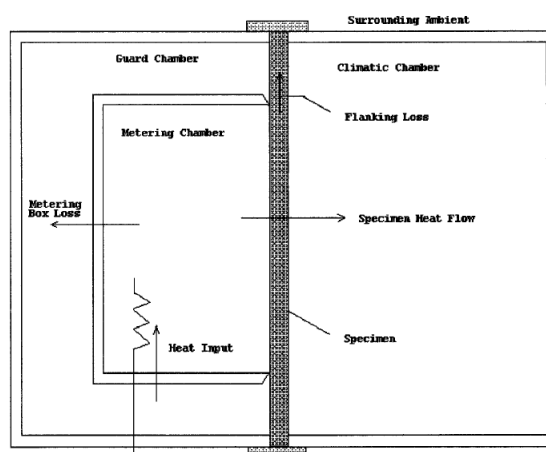
De Calibrated Hot Box methode heeft dezelfde opbouw als dat van de Guarded Hot Box, maar maakt geen gebruik van een individuele 'Metering Box' en 'Guarded Chamber'. Hierbij is de Hot Box gelijk ook de Metering Chamber (zie Figuur 15). Het is hierbij wel van belang dat de Hot Box voldoende geïsoleerd is om betrouwbare metingen te kunnen uitvoeren.

ASTM C976 is een norm die specifieker ingaat op de Calibrated Hot Box. De Hot Box methode wordt vooral gebruik om de thermische prestatie te meten terwijl het in dit onderzoek is van belang dat het vochttransport in beeld gebracht wordt. De ASTM C1363 geeft aan dat het mogelijk is de testopstelling zodanig te maken dat deze ook het vochttransport monitort binnen dezelfde opstelling. De Calibrated Hot Box methode is daarom geschikt om een dampdiffusie open gevelconstructie in te testen, indien de juiste aanpassingen worden gedaan.

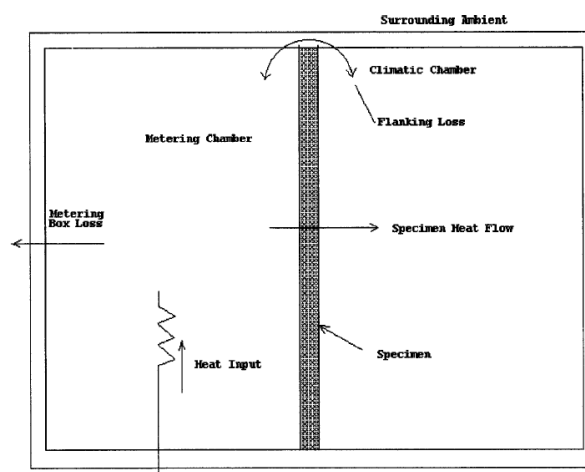
Zoals eerder is aangegeven [subparagraaf 5.8.2](#), kan volgens het rapport 'Use of an environmental chamber to investigate large-scale envelope specimen hygrothermal performance' (Derome, Fazio, Anthientis, & Rao), hygrosensoren in het testmonster geplaatst worden. Hierin is omschreven dat vochttransport de moeilijkste parameter is om te meten vergeleken bij warmteoverdracht en luchtstromen. In de gebruikte Guarded Hot Box zijn op drie locaties metingen uitgevoerd:

- Direct in de isolatie, met relatieve vochtigheid sensoren.
- Indirect in hygroscopisch materialen zoals hout. Met vochtgehalte sensoren.
- Het nemen van monsters en deze vervolgens te wegen, te drogen en nogmaals te wegen om het vochtgehalte te meten (zie [paragraaf 5.7](#)).

In dit rapport wordt beweerd dat de verschillende methoden alle drie hun nadelen hebben. De belangrijkste daarvan is de representativiteit van de metingen. Het is onrealistisch om van uniforme metingen uit te gaan in zulke complexe samengestelde constructies. Er kan hierbij geconcludeerd worden dat het wel mogelijk is om het vochttransport te meten in deze testopstelling. Echter is het lastig om betrouwbare metingen uit te voeren vanwege de complexiteit van vochttransport.



Figuur 14: Schematische opbouw Guarded Hot Box methode volgens C1363 (ASTM Standards, 1997).

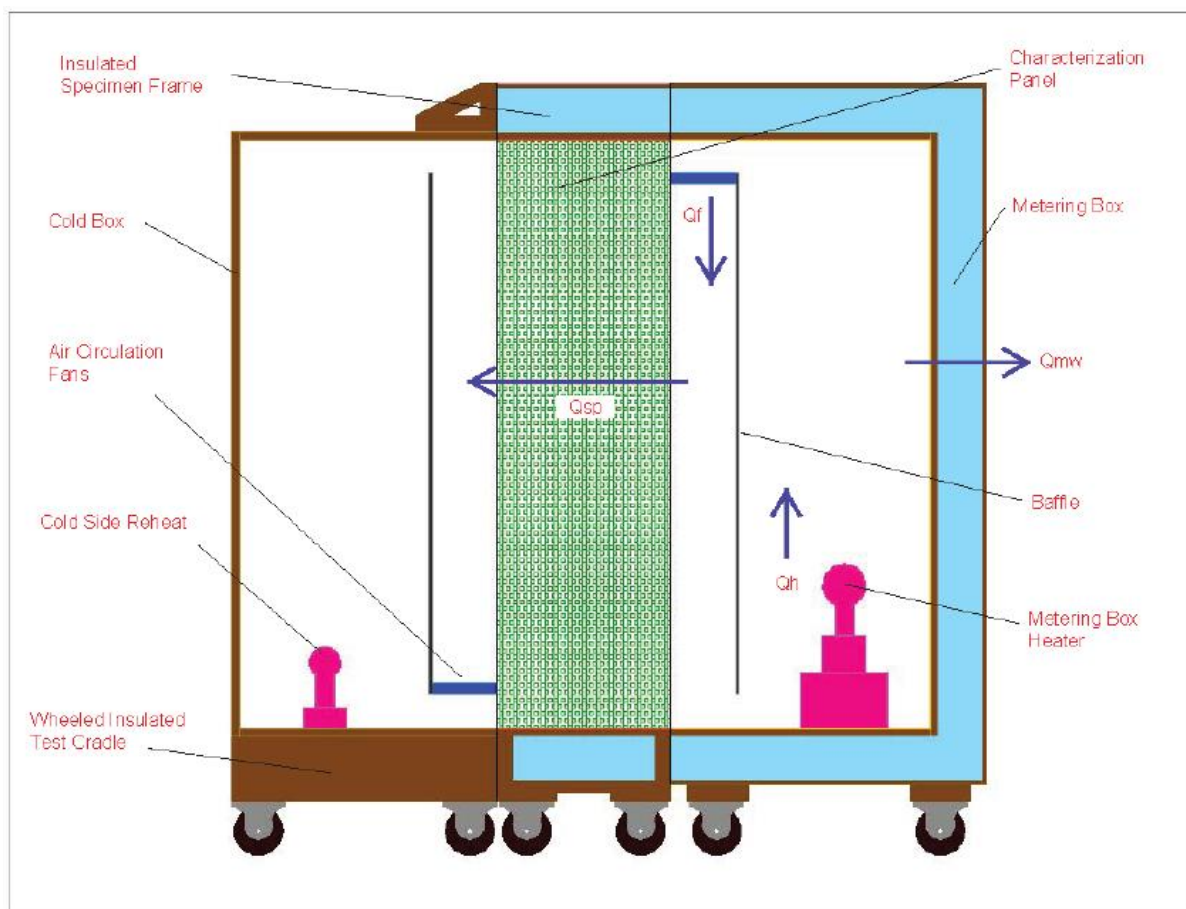


Figuur 15: Schematische opbouw Calibrated Hot Box methode volgens C1363 (ASTM Standards, 1997).

5.13. Een betaalbare Hot Box testopstelling

Het rapport; 'Design of an Affordable Hot Box Testing Apparatus' (Seitz & MacDougall) omschrijft hoe een Hot Box testopstelling is ontworpen die goedkoper kleinschalige testen kan uitvoeren, voor non-conventionele (bouw)panelen, dan veel bestaande Hot Box testopstellingen dat kunnen. Zij beschrijven dat de kosten voor een individuele test in een geaccrediteerd laboratorium kan verschillen tussen de \$6.000 en \$20.000. Veel laboratoria hebben een wachtlijst van een aantal maanden en voor kleinere bedrijven, die maar betrokken zijn bij een paar bouwwerken per jaar, is dit in combinatie met de kosten niet betaalbaar. Seitz en MacDougall hebben de testopstelling gerealiseerd met circa \$37.000. Hierbij dient rekening gehouden te worden met dat de kosten voor de klimaatkamer en koelingsapparatuur voor de Cold Box niet zijn meegenomen, omdat Seitz en MacDougall ervan uitgaan dat vele universitaire laboratoria beschikken over deze installatie. De kosten voor het hanteren van de verwarmings- en koelingsapparatuur is ook niet meegenomen omdat deze sterk afhankelijk is van de soort apparatuur, kwaliteit van de isolatie in klimaatkamers en de tijd die nodig is om een nulpunt te vinden voordat er getest kan worden (zie [subparagraaf 5.3.1](#)).

De testopstelling die door Seitz en MacDougall is ontworpen betreft alleen het testen van de thermische prestaties en betreft hier geen vocht bij, wat wel cruciaal is bij het testen van dampdiffusie open gevelconstructies. Deze testopstelling is geschikt om als referentie te gebruiken. Echter dienen er wel aanpassingen gedaan te worden zodat dat testopstelling voldoet aan de randvoorwaarden weergegeven in [paragraaf 5.11](#). De Calibrated Hot Box in combinatie met deze randvoorwaarden zou in staat moeten zijn om testmonster te kunnen testen op vochttransport.



Figuur 16: Schematische opbouw van 'betaalbare' Calibrated Hot Box, bron data; (Seitz & MacDougall).

6. Conclusies

Het doel van dit onderzoek is het beantwoorden van de vraag; *'Wat is het optimale ontwerp voor een bouwphysische meetopstelling voor het meten van de thermohygrische eigenschappen van een biobased gevelement in een dampdiffusie open gevelconstructie, conform de Nederlandse wet- & regelgeving en normen.'* Met een kwalitatief ontwerpend onderzoek is gezocht naar de oplossing voor deze testopstelling.

Uit de resultaten naar de juiste testopstelling is gebleken dat de Calibrated Hot Box geschikt is als basis voor het testen van dampdiffusie open gevelconstructies. Deze testopstelling wordt omschreven in de ASTM C1363 Standard. De Nederlandse equivalent van de ASTM C1363 is de 'NEN-EN 1934:1997 en'. Deze omschrijft waaraan de Hot Box, oftewel de warmtekast, dient te voldoen tijdens de realisatie. De Calibrated Hot Box wordt normaliter gebruikt om de thermische prestaties van samengestelde gevels te meten. Met de juiste aanpassingen kan deze testmethode worden omgebouwd zodat ook de hygrische prestaties gemeten kunnen worden. Deze aanpassingen dienen te voldoen aan de gestelde randvoorwaarden voor het testen van dampdiffusie open gevelconstructies in het kader van dit onderzoek. Indien de testopstelling wordt gerealiseerd om accurate en specifieke metingen te kunnen uitvoeren, kunnen de kosten voor het bouwen van de testopstelling hiervoor oplopen van €150.000 tot en met €1.000.000. Er is een mogelijkheid kleinschalige testen uit te voeren waarbij de kosten voor het bouwen van de testopstelling circa €37.000 zijn. In verband met de aanpassingen aan de testopstelling zullen deze kosten oplopen. Hoeveel is echter onbekend. Het is van belang dat de locatie waar het product uiteindelijk wordt toegepast is bepaald vanwege het uitvoeren van de juiste klimaatsimulatie in de testopstelling. Daarbij is in overleg met de opdrachtgever besloten om het klimaat binnen Nederland aan te houden.

Hieronder zijn de voorwaarden getoond waaraan de aangepaste Calibrated Hot Box, voor het testen van de thermohygrische eigenschappen, dient te voldoen.

- Twee gekoppelde klimaatkamers.
- Testmonster (gevel) tussen klimaatkamers.
- Elke klimaatkamer een eigen klimaatregeling.
- Klimaatregeling monitoren en regelen op: temperatuur, relatieve vochtigheid en dampspanning.
- Klimaatkamers dampdicht uitvoeren.
- Klimaatkamers luchtdicht uitvoeren.
- Klimaatkamers geïsoleerd uitvoeren.
- Aansluitingen koudebrug vrij uitvoeren.
- Capaciteit van apparatuur in klimaatkamers voor temperatuur: van -15°C tot 40°C.
- Capaciteit van apparatuur in klimaatkamers voor relatieve vochtigheid: van 10% tot 95%.
- Simulatie dient uitgevoerd te worden op basis van een 'seizoen-cyclus' (1 jaar). Dit betekent niet dat de tijdperiode van de test een jaar dient te bedragen.
- Afwerking van de binnenzijde klimaatkamers is uitgevoerd in minimaal RVS-304 of RVS-316 (roestvaststaal) in verband met dampdicht zijn.
- Er dient rekening gehouden te worden met dat de afwerking van de binnenzijde klimaatkamers 'glad' zijn, in verband met reinigbaarheid.
- Afwerking van wanden, plafond en vloer is bestendig tegen corrosie als gevolg van hoge relatieve vochtigheden. Dit kan eventueel opgelost worden door middel van een coating. Corrosieklasse C2, naar aanleiding van NEN-EN-ISO 12944-2; Verven en vernissen - Bescherming van staalconstructies tegen corrosie door middel van verfsystemen - Deel 2: Indeling van belastingsklassen, is voldoende met betrekking tot dit onderzoek.
- Gelaste naden worden aanbevolen boven kitnaden in verband met dampdiffusiedichtheid.
- Testopstelling dient 'inloopbaar' te zijn.

- Testmonster dient relatief groot van oppervlak te zijn om realistische representatieve waarden uit de metingen te kunnen waarnemen. In verband met de inloopbaarheid en uniformiteit van de metingen dient het testmonster een oppervlakte te hebben van minimaal 2×2 m.
- Testopstelling dient los van de vloer te staan om warmteoverdracht met de onderliggende vloer te minimaliseren.

De benodigde apparatuur voor de klimaatregeling dient nader besproken te worden met deskundigen of installatiebedrijven. Er kan geconcludeerd worden dat een elektrische installatie het meest gunstig is. Bij het uitvoeren van de klimaatsimulaties dient rekening gehouden te worden met de relatie tussen luchttemperatuur en luchtvochtigheid. Deze beïnvloeden elkaar sterk en dit vereist een juiste bepaling. De keuze voor thermosensoren dient nader besproken te worden met een deskunige. Wel kan geconcludeerd worden dat er sensoren bestaan die geschikt zijn voor de toepassing binnen deze testopstelling. Sensoren dienen op de specifieke locaties te worden geplaatst (zie Tabel 17) om het klimaat binnen de testopstelling te kunnen regelen en tevens het vochttransport binnen het testmonster te kunnen monitoren.

	Klimaatkamer 'binnen'		Klimaatkamer 'buiten'		Gevel (monster) Tussen lagen	Gevel in 'dikke' lagen (indien mogelijk)	Sensor
	invoer	uitvoer	invoer	uitvoer			
Temperatuur [°C]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Thermo-sensor
Relatieve vochtigheid [%]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Hygro-sensor

Tabel 17: locaties sensoren

Hygrosensoren voor het monitoren van het vochttransport in het testmonster zijn beschikbaar en toepasbaar. Zogenoemde capacitieve sensoren zijn hiervoor het meest geschikt. Sensoren dienen centraal in het testmonster geplaatst te worden om de invloed van randeffecten te vermijden. Tevens dient er een minimaal aantal van negen sensoren te worden geplaatst om een volledig beeld van het vochttransport te kunnen monitoren. Indien er hout wordt toegepast dienen er vochtgehaltesensoren geplaatst te worden om het vochtgehalte in het hout te monitoren. Het vochtgehalte mag niet hoger zijn dan 21% bereiken, omdat vanaf dit percentage er risico op houtschimmel aanwezig is.

Het systeem voor de klimaatregeling dient zodanig te zijn aangesloten ([subparagraaf 5.9.3.](#)) dat een computer de waarnemingen van de testmonstersensoren kan opslaan en die van de klimaatkamersensoren kan omzetten tot aansturing van de apparatuur als in: verwarming, koeling, bevochtiging en ontvochtiging. Voor het bevochtigen en ontvochtigen wordt aanbevolen om een adiabatisch proces toe te passen om warmtewisseling met de omgeving te minimaliseren.

Software om het vochttransport te simuleren is niet persé nodig in deze testopstelling. Wel is het van belang dat software gebruikt wordt om de waarden afkomstig uit de sensoren te verwerken. Deze wordt vaak meegeleverd met de klimaatinstallatie.

Er is geen wet- en regelgeving van toepassing op dampdiffusie open bouwen, noch zijn er normen of richtlijnen die bepalen hoe er dampdiffusie open gebouwd moet worden. Wel is geconcludeerd dat er normen zijn waarmee bepaald kan worden wat de dampdoorlatendheid is van een materiaal. Dit betreft een aparte test welke de dampdiffusieweerstand bepaalt (μ -waarde) van een homogeen materiaal. De norm NEN-EN-ISO 12572 (bekermethode) wordt gebruikt om de dampdiffusieweerstand van bouwmaterialen te bepalen. De norm NEN-ISO 21129 (boxmethode) is geschikter voor het bepalen van de dampdiffusieweerstand van materialen met een lage dampdiffusieweerstand. Tevens zijn er meerdere normen voor het bepalen van de dampdiffusieweerstand en deze zijn afhankelijk van de materiaalsoort (zie Tabel 15).

Voor het bepalen van de juiste externe klimaatsituatie voor de simulatie zijn er drie mogelijkheden.

1. De waarden uit NEN-EN-ISO 13788 kunnen worden overgenomen, die een gemiddeld klimaat binnen Nederland voorstellen.
2. Indien een specifieke locatie bekend is kunnen de in Tabel 16 genoemde normen worden gebruikt.
3. Deze optie gaat uit van de gegevens van het KNMI. In het kader van dit onderzoek zijn deze gegevens nader onderzocht en hier is een maandgemiddelde jaaroverzicht van gemaakt dat is weergegeven in Tabel 11.

NEN-EN-ISO	7726	:2001 en	<i>Ergonomie van de thermische omgeving - Instrumenten voor het meten van fysische grootheden</i>
NEN-EN-ISO	7730	:2005	<i>Klimaatomstandigheden - Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid</i>
NEN-EN-ISO	15927	Deel 1	<i>Hygro-thermische eigenschappen van gebouwen - Berekening en weergave van klimatologische gegevens.</i>

Tabel 16: Normen met betrekking tot het vaststellen van het klimaat.

	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Temperatuur [°C]	3,1	3,2	6,0	9,4	12,9	16,4	18,0	17,7	14,9	10,9	7,2	4,3
Dampdruk [hPa]	6,7	6,8	7,8	8,8	11,2	13,5	15,6	15,1	13,8	11,3	9,0	7,3
Relatieve vochtigheid [%]	88	85	83	77	76	78	78	79	84	86	89	90

Tabel 11: Externe simulatie m.b.v. maandgemiddelden in Nederland, bron data; KNMI

Voor de temperatuur voor de simulatie van het interne klimaat is de Adaptieve Temperatuur Grenswaarden (ATG) methode het meest geavanceerd. Deze is gebaseerd op de Fanger methode, maar heeft een veldonderzoek toegepast die de beleving uit de praktijk heeft bestudeerd. De ATG methode maakt een onderscheid tussen alpha en bèta gebouwen en gaat uit van kantoor- en utiliteitsbouw en houdt rekening met de mogelijkheid om ramen te openen en kleding te veranderen. De Fanger methode is niet accuraat als het aankomt op het voorspellen van een behaaglijk thermisch binnenklimaat bij natuurlijk geventileerde ruimten of passief gekoelde gebouwen, waarbij de ATG methode dat wel is. Voor het berekenen van een behaaglijke relatieve vochtigheid kan het model van de Rotte (1992) worden gebruikt.

Buitenom de klimaatsimulatie op jaarbasis is het aanbevolen om een 'extreem klimaat' simulatie uit te voeren. Uit de resultaten is gebleken dat extreme klimaten binnen Nederland bestaan uit hitte- en koudegolven. Om deze extreme klimaten te kunnen simuleren dienen de volgende simulaties te worden uitgevoerd:

Koudegolven 10 dagen bij een temperatuur van -10°C

Hittegolven 10 dagen bij een temperatuur van 30°C

Voordat enige simulatie uitgevoerd kan worden dient er een voorsimulatie gedaan te worden. Dit zorgt ervoor dat de temperatuur en het vochtgehalte in het testmonster gelijk is aan een moment binnen de simulatiecyclus. Zodra de temperatuur en het vochtgehalte een evenwicht hebben gevonden in de voorsimulatie kan de test worden gestart. Hierbij maakt het niet uit op welk punt van de simulatie wordt gestart als er maar op jaarbasis wordt gesimuleerd.

Wind en zonlicht zijn in het kader van dit onderzoek uitgesloten omdat deze een positieve invloed zouden hebben op het afvoeren van damp uit het testmonster. De filosofie hierachter is dat als het testmonster

voldoet aan de eisen zonder wind en zonlicht, deze ook zal voldoen inclusief deze factoren. Er kan naderhand voor gekozen worden om deze factoren alsnog toe te passen.

In overleg met de opdrachtgever is geconstateerd dat de kosten van €150.000 tot en met €1.000.000 niet binnen het budget passen. Het is hierbij dus aanbevolen om nader te kijken naar de testopstelling ontworpen door Seitz en MacDougall. Inclusief de aanpassingen zijn de kosten van deze opstelling geschat op €50.000. Deze kosten zijn in overleg met de opdrachtgever bespreekbaar.

Het is van belang op voorhand te bepalen welke parameters er meegerekend worden in het uitvoeren van de testen. Zo zijn er bepaalde parameters die altijd meegerekend dienen te worden zoals; temperatuur, relatieve vochtigheid, dampdiffusie, inwendige condensatie. Andere parameters zijn afhankelijk van de gevel die getest gaat worden. Hier is van belang om op voorhand te bepalen of de volgende parameters meegenomen dienen te worden;

- Vochtgehalte hout
- Luchtlekken
- Wind en zonlicht
- Dag en nacht
- Randeffecten en koudebruggen

7. Discussie en aanbevelingen

Dit onderzoek is uitgevoerd aan de hand van een kwalitatief ontwerpende methode. De oorzaak hiervan was dat dit onderzoek geen vastgestelde werkwijze en verwachting had. Tevens gaf dit het onderzoek de mogelijkheid zich te ontwikkelen tijdens het proces. De resultaten uit dit onderzoek leiden niet zozeer tot een direct antwoord op de vraag, maar meer naar een ontwerp met bijhorende randvoorwaarden. Bij een ontwerp is er altijd een mogelijkheid tot discussie. Echter is het proces hiertoe net zo belangrijk. Tijdens dit proces is er een schetsconcept ontworpen, die met deskundigen is besproken op uitvoerbaarheid. Tegen het eind van dit onderzoek is hierbij informatie naar voren gekomen dat er al een soortgelijke testopstelling bestaat, genaamd de Hot Box (warmtekast). Na nader onderzoek en contact met deskundigen is geconstateerd dat deze bestaande testopstelling als basis gebruikt kan worden, echter dienen er wel de nodige aanpassingen te worden gedaan. Uit het feit dat het schetsontwerp dat is ontwikkeld als gevolg van het onderzoek vergelijkbaar is met de bestaande testopstelling inclusief aanpassingen, kan gesteld worden dat het ontwerpresultaat valide is.

De randvoorwaarden die voortgekomen zijn uit het concept dampdiffusie open bouwen, welke zijn vastgesteld door vergelijkingen te maken tussen verschillende literatuur, zijn vervolgens gevalideerd door deskundigen in Nederland. Dampdiffusie open bouwen is in Nederland een vrij nieuw concept vergeleken bij bijvoorbeeld Canada of Duitsland. Het kan daarom zo zijn dat er in deze landen extra informatie is, dat Nederland nog niet heeft bereikt. Vanwege beperkte taalkundigheid zijn Engelse bronnen beperkt en Duitse bronnen niet onderzocht. Het is aanbevolen hier wel onderzoek naar te doen. WUFI (Duitsland) is een instelling die zich onder andere richt op thermohygrische principes.

Het resultaat op externe klimaatbepaling geeft voor de aanpak drie mogelijkheden. Volgens S. Uittenbosch (2012) zijn alle drie de mogelijkheden correct, maar is de keuze afhankelijk of de locatie van toepassing van het product bepaald is. Indien die niet bepaald is kan het externe klimaat zowel bepaald worden volgens de NEN-EN-ISO 13788 als volgens de gegevens van het KNMI. Hiertussen zit een verschil, waarvan de oorzaak onbekend is. Het is discutabel tot in hoeverre dit verschil invloed heeft, omdat het verloop op jaarbasis wel vergelijkbaar is. Voor de test bij extreem klimaat geldt hetzelfde principe en is de klimaatbepaling afhankelijk van de locatie. De gemiddelde duur van 10 dagen is voor Nederlandse begrippen realistisch, echter kan dit voor specifieke locaties verschillen.

Voor de bepaling van het binnenklimaat zijn ook meerdere mogelijkheden gegeven. Het model Adaptieve Temperatuur Grenswaarden (ATG) is als resultaat het meest geschikt. De juiste methode is echter nog wel afhankelijk van de functie in het gebouw en het daarbij horende binnenklimaat.

Het is aanbevolen om op voorhand de locatie te bepalen, zodat het externe klimaat hierop aangepast kan worden. Indien dit Nederland is kunnen waarden uit dit onderzoek worden overgenomen. Dit geldt tevens voor de functie binnen een bouwwerk. Hier kan vervolgens worden bepaald welk klimaat er voor de interne simulatie wordt gebruikt.

Wind en zonlicht hebben een positief effect op de dampdiffusie met betrekking tot de droging van de gevel (Kuindersma, 2017). Om een volledig realistisch test uit te voeren dienen deze wel toegepast te worden. Dit is relatief gemakkelijk uit te voeren door infrarood lampen en ventilatie in de testopstelling te installeren. Het is wel aanbevolen nader onderzoek te doen naar zonlichturen, stralingssterkte met betrekking tot de zon en naar windsterkte.

In het kader van dit onderzoek zijn softwareprogramma's zoals genoemd in bijlage II niet van toepassing, omdat deze een voorspelling maken van het vochttransport. De testopstelling is bedoeld om primaire waarden te monitoren, waarna met behulp van softwareprogramma's, simulaties mee gemaakt kunnen

worden. Er is software nodig om de sensorwaarnemingen te verwerken en weer te geven op een gebruiksvriendelijke manier. Tevens kan de testopstelling gebruikt worden om de simulatiesoftware te controleren op correctheid. Dit is eventueel een vervolgonderzoek, nadat de testopstelling juist gebouwd en gekalibreerd is. Hierbij wordt aanbevolen om een deskundige nader onderzoek te laten doen naar softwareprogramma's en hoe deze in de testopstelling kunnen worden geïmplementeerd. Dit is van belang om gegevens te verwerken tot gebruiksvriendelijke data.

Momenteel zijn er geen normen die bepalen hoe dampdiffusie open gevelconstructies opgebouwd dienen te worden. Wel kunnen homogene materialen worden getest op dampdiffusieweerstand (Nieman, 2017). N. Prinsen (2015) beweert dat een materiaal dampdiffusie open is als het een Sd-waarde heeft van $\leq 0,50$ m. A. Tilmans & T. De Mets (2017) beweren dat een gevel dampdiffusie open is als het een Sd-waarde heeft van ≤ 3 m. Voordat een gevelconstructie getest gaat worden in de testopstelling is het aanbevolen om de Sd-waarde van een gevel te bepalen en deze binnen deze waarden te houden om een effectieve test uit te kunnen voeren. Tevens kan er voor gekozen worden om zogenaamde 'dampdichte' gevels te testen om een realistisch effect van vochttransport in de gevel te monitoren.

Er is geconcludeerd dat er vele typen sensoren beschikbaar zijn die gebruikt kunnen worden binnen de testopstelling. Vanwege beperkte deskundigheid over sensoren is er geen specifieke sensor voorgeschreven. Wel is geconcludeerd dat er sensoren bestaan die geschikt zijn om het vochtgehalte in gevelconstructies te meten. Het is echter discutabel tot in hoeverre de waarnemingen van deze sensoren betrouwbaar zijn (Derome, Fazio, Anthientis, & Rao). Het is daarom aanbevolen om nader te onderzoeken tot in hoeverre deze sensoren in staat zijn betrouwbare metingen uit te voeren.

Apparatuur voor de testopstelling is beschikbaar in vele soorten en maten. Dit onderzoek kan helaas niet de gehele samenstelling van de apparatuur opnemen vanwege beperkte deskundigheid. Uit contact met respondenten is gebleken dat installatiebedrijven de volledige apparatuur voorschrijven. Het is daarom aanbevolen om met een deskundige en/of installatiebedrijf in gesprek te gaan om dit te laten bepalen. Dit geldt tevens voor de aansluiting van de apparatuur met sensoren, dataloggers, computer, hardware en software.

Het bouwen van klimaatkamers kan professioneel worden uitgevoerd door bedrijven die gespecialiseerd zijn om klimaatkamers te realiseren. Uit contact met respondenten en naar aanleiding van de studie is gebleken dat geen enkele klimaatkamer hetzelfde is en deze specifiek worden ontworpen voor de opdrachtgever. Dit onderzoek behandelt niet de technische opbouw van de klimaatkamers vanwege beperkte specialistische kennis en tijd. Het ontwerp is afhankelijk van de randvoorwaarden en dit onderzoek is daarom ook hierop gericht. Het is daarom aanbevolen met een deskundige en/of bedrijf die klimaatkamers bouwt aan tafel te gaan om dit ontwerp te bespreken. Dit heeft vooral betrekking op de aansluitingen van de klimaatkamer en het hierbij voorkomen van koudebruggen. Tevens is tijdens deze studie naar voren gekomen dat er enkele bedrijven geïnteresseerd zijn deze testopstelling uit te voeren. Hier is de opdrachtgever van op de hoogte gebracht.

De kosten voor een commerciële Hot Box (warmtekast) testopstelling kan van €150.000 oplopen tot €1.000.000. In overleg met de opdrachtgever zijn deze kosten ver boven het budget van het Lectoraat Biobased Bouwen. Seitz en MacDougall hebben een ontwerp gemaakt voor een 'betaalbare' Hot Box testopstelling. Deze is ontworpen in Canada en is gebaseerd op de ASTM C1363. De vergelijkbare norm in Nederland is de NEN-EN-ISO 1934. Het is aanbevolen om deze norm nader te onderzoeken en na te gaan of er een 'betaalbare' testopstelling ontworpen kan worden naar aanleiding van NEN-EN-ISO 1934.

8. Literatuurlijst

- Afstudeerbegeleider. (sd). *Afbakening*. Opgehaald van Afstudeerbegeleider:
<http://www.afstudeerbegeleider.nl/afbakening/>
- Arbovakbase. (2015, April 24). *Richtlijnen algemene thermische behaaglijkheid*. Opgehaald van Arbovakbase:
<http://www.arbovakbase.nl/artikel/richtlijnen-algemene-thermische-behaaglijkheid-11238.html>
- Architecten Gilde. (sd). *Bouwfysica tabellarium overzicht materiaaleigenschappen*. Opgehaald van Architecten Gilde:
http://www.architectengilde.nl/wp-content/uploads/2013/09/Bouwfysica_tabellarium_overzicht_materiaaleigenschappen.pdf
- ASTM Standards. (1997). *C1363*. West Conshohocken: ASTM Standards.
- Aterno. (2013, 12 18). *Elektrische verwarming, olie of gas?* Opgehaald van Aterno: <http://www.aterno.be/nl/elektrische-verwarming-olie-gas.html>
- Beek, M. v. (2006). *Adaptieve Temperatuurgrenswaarden Adaptieve Temperatuurgrenswaarden*. Den Haag: TU Delft.
- Berg, E. v., & Kouwenhoven, W. (2008). Ontwerponderzoek in vogelvlucht. *Tijdschrift voor lerarenopleiders*, p. 20 t/m 26.
- Best, P. (2017, 3 8). Klimaatkamers Scheldebouw. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Bos, R. (2014, Juni 10). *Dampopen isoleren*. Opgehaald van Club green: <https://www.clubgreen.nl/dampopen-isoleren/>
- Böttger, W. (2016, september 30). Het lectoraat biobased bouwen interview. *Biobased Bouwen op zoek naar een toegevoegde waarde*, pp. 28-31.
- Bouwcentrum advies. (sd). *Bouwfysica tabellarium*. Opgehaald van Joost de Vree:
http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgb/bouwfysisch_tabellarium_www_bouwcentrum-advies_nl.pdf
- Bruggink, D. (2017, 02 21). *Biobased*. Opgehaald van Ensie: <https://www.ensie.nl/daan-bruggink/biobased>
- Buishand, T., & Velds, C. (sd). *Klimaat van Nederland 1. Neerslag en verdamping*. Nederland: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Daidalos Peutz bouwfysisch ingenieursbureau. (2007). *Nieuwe technieken in de klimatisatie*. Schelle: Vereniging voor Technische Diensthoofden in de.
- de Rotte, D. J. (1992). *Behaaglijkheidstheorie*. 's Hertogenbosch: Hogeschool 's Hertogenbosch.
- Derome, D., Fazio, P., Anthientis, A., & Rao, J. (sd). *Use of an environmental chamber to investigate large-scale envelope specimen hygrothermal performance*. Montreal: Concordia University.
- Detting, D. (2017, Maart 23). Dampdiffusie open bouwen. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Donner, J. (2011, Augustus 11). Staatsblad der Koninkrijk der Nederlanden 416: Besluit van 29 augustus 2011 houdende vaststelling van voorschriften met betrekking tot het bouwen, gebruiken en slopen van bouwwerken (Bouwbesluit 2012). Nederland.
- Engel, J. v. (2017, Maart 23). Bouwfysica. (Y. Verhoeven, Interviewer)

- Glabbeek, N. v. (2012). *Succesvol studeren, communiceren en onderzoeken 2e editie*. Amsterdam: Pearson Benelux bv.
- Groenhart houtskeletbouw. (2015). *Groenhart houtskeletbouw*. Opgehaald van damp-open bouwen: <http://www.groenhart-houtskeletbouw.nl/damp-open-bouwen>
- Hasselaar, E. (2015, Mei 25). *Vochtbalans woning*. Delft, Zuid Holland, Nederland: TU Delft.
- Hendriks, R. (sd). *Gassen en dampen*. Opgehaald van Roehendriks: <http://www.roelhendriks.eu/Natuurkunde/w3B%20gassen%20en%20dampen/gassen%20theorie.pdf>
- Internationale woordenboek. (2017). *Thermo*. Opgehaald van Internationale woordenboek: http://internationale-woordenboek.com/definitions/?dutch_word=thermo-
- Jain, P. (2012). *Humidity Sensor*. Opgehaald van Engineers Garage: <https://www.engineersgarage.com/articles/humidity-sensor?page=1>
- Jong, R. d. (2013). *Achtergrondrapport bouwfysica buitengevelisolatiesystemen*. Tiel: Sto Isoned B.V.
- Kernerman Dictionaries. (sd). *Ethisch*. Opgehaald van Woorden: <http://www.woorden.org/woord/ethisch>
- Koenders, P. (2016, september 30). Transitie naar een biobased samenleving. *Biobased bouwen; op zoek naar toegevoegde waarde*, pp. 4-5.
- Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut. (sd). *Kennis- & datacentrum*. Opgehaald van KNMI: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/>
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2013). *NEN-EN-ISO 13788*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. Opgehaald van NEN: https://www.nen.nl/pdfpreview/preview_179390.pdf
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2013). *NEN-EN-ISO 13788 pdf preview*. Opgehaald van NEN: https://www.nen.nl/pdfpreview/preview_179390.pdf
- Kuindersma, P. (2017, Februari 27). Bouwfysica dampdiffusie open bouwen. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Kurvers, S., van der Linden, K., & H., C. (2012). *Literatuurstudie thermisch comfort*. Delft: Agentschap NL.
- Lectoraat Biobased Bouwen. (sd). *Lectoraat Biobased Bouwen*. Opgehaald van Avans: <http://www.avans.nl/onderzoek/expertisecentra/centre-of-expertise-biobased-economy/lectoraten/biobased-bouwen/deelnemers/biobased-bouwen/willem-bottger>
- Liefbroer, A. (2017, Mei 15). Realisatie klimaatkamer. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Meerkerk, H., & Vries, J. d. (2016, Januari). Biobased dampopen gevels. Rotterdam, Zuid Holland, Nederland.
- Nieman, H. (2017, Mei 3). Normen dampdiffusie open bouwen. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Peutz. (sd). *Klimaatkamers*. Opgehaald van Peutz: <http://www.peutz.nl/node/134>
- Poortinga, E. (sd). *Deskresearch en literatuuronderzoek: het verschil*. Opgehaald van Studiemeesters: <http://www.studiemeesters.nl/studietips/verschil-tussen-deskresearch-literatuuronderzoek-theorie/>
- Prinsen, N. (2015, Juli). Dampopen bouwen doe je zo. Delft, Zuid Holland, Nederland: SBRCURnet.

- Prinsen, N. (2016, juni 20). *Bouwen met biobased materialen*. SBRCURnet. Opgehaald van Bouwen met biobased materialen.
- Prinsen, N. (2016, juni 20). *SBRCUR*. Opgehaald van Bouwen met biobased materialen.
- Punte, H. (2017, Mei 2). Realisatie klimaarkamer. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Redactie Ensie. (2017, 02 21). *Bouwbesluit*. Opgehaald van Ensie: <https://www.ensie.nl/redactie-ensie/bouwbesluit>
- Remans, D. (2017, April 3). Klimaatkamers TNO. (Y. Verhoeven, Interviewer) Nederland.
- Scriptium. (sd). *Afbakening van je onderzoek*. Opgehaald van Scriptium: <https://www.scriptium.nl/afbakening-van-je-onderzoek/>
- Seitz, S., & MacDougall, C. (sd). *Design of an Affordable Hot Box Testing Apparatus*. Kingston: Queen's University.
- Stybenex. (sd). *Basisinformatie*. Opgehaald van Stybenex: <http://stybenex.nl/documentatie/basisinformatie/>
- Stybenex. (sd). EPS en vocht. Zaltbommel, Nederland.
- Tecum. (sd). *Verklarende woordenlijst*. Opgehaald van Tecum: <http://www.tecum.nl/verklarende-woordenlijst>
- Tilmans, A., & De Mets, T. (2017, Februari). *Dampopen wanden*. Opgehaald van WTCB: <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact54&art=824>
- Toets je parate kennis over. (2016). *Software testen*. Opgehaald van Toets je parate kennis over: <https://www.toets-je-parate-kennis-over.nl/software-testen/kennisbank/verschil-testen-en-toetsen/>
- Trinivast Beheer B.V. (sd). *Verklarende woorden*. Opgehaald van Trinivast: http://www.trinivast.nl/index.php?option=com_content&task=view&id=26&Itemid=40
- Uges, P. (sd). Het Mollierdiagram in theorie en praktijk. *RCC koude & luchtbehandeling*. Opgehaald van Airco-Kenniscentrum.
- Uittenbosch, S. (2012). *Risico van inwendige condensatie in een externe*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
- van Beek, M. (2006). *Adaptieve Temperatuurgrenswaarden Adaptieve Temperatuurgrenswaarden*. Den Haag: TU Delft.
- VROM. (2006, augustus). Ventileren. Den Haag, Noord Holland, Nederland.
- Wikipedia. (2016, december 11). *Zeeklimaat*. Opgehaald van Wikipedia: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Zeeklimaat>
- Wikipedia. (2017, januari 31). *Norm (standaard)*. Opgehaald van Wikipedia: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Norm_\(standaard\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Norm_(standaard))
- WikiWoordenboek. (sd). Opgehaald van Woorden.org: <http://www.woorden.org/woord/warmteoverdracht>

Bijlage I



Dampdiffusie open bouwen.

Wat houdt dampdiffusie open bouwen in?

Deelonderzoek
Versie 3

Auteur: Y. Verhoeven
Studentnummer: 66801
Opleiding: Bouwkunde Voltijd

HZ University of Applied Sciences
1^e begeleider: I. Weegels
2^e begeleider: B. Vercouteren

Centre of Expertise Biobased Economy,
lectoraat biobased bouwen
Stagebegeleider: W. Böttger

Inhoud

1.	INLEIDING	1
2.	DAMPDIFFUSIE OPEN BOUWEN	1
2.1.	VOCHTIGE LUCHT	1
2.2.	VENTILEREN EN ENERGIEBESPARING	2
2.3.	BEPALING DAMPDIFFUSIE OPEN BOUWEN	2
3.	KLIMATOLOGIE IN NEDERLAND	3
3.1.	TEMPERATUREN, INTERNATIONAAL	4
3.2.	TEMPERATUREN, NEDERLAND	5
3.2.	DAMPSPANNING & RELATIEVE LUCHTVOCHTIGHEID, NEDERLAND	9
3.3.	WIND EN ZONLICHT	11
3.4.	BINNENKLIMAAT	11
3.4.1.	<i>Binnenklimaatklassen</i>	12
3.4.2.	<i>De Methode Fanger</i>	12
3.4.3.	<i>De GTO Methode</i>	13
3.4.4.	<i>De ATG methode</i>	13
3.5.	DE INVLOED VAN DAG EN NACHT	16
4.	KLIMAATSIMULATIE	17
4.1.	NULPUNT BEPALEN	17
4.2.	EXTERNE SIMULATIE	18
4.3.	INTERNE SIMULATIE	20
4.4.	EXTREME KLIMAAT SIMULATIE	22
3.	CONCLUSIE	24
4.	BIBLIOGRAFIE	28

1. Inleiding

Dampdiffusie open bouwen is een concept waarin gevels uitgevoerd kunnen worden. Het gaat hierbij om gevels die zogenaamd 'ademen' in tegenstelling tot dampdichte gevels die als het ware 'luchtdicht' zijn. In dit deelonderzoek wordt er dieper ingegaan op wat dampdiffusie open bouwen exact inhoudt en waar rekening mee gehouden dient te worden. Wat zijn de kenmerken van dampdiffusie open bouwen? Tevens wordt in beeld gebracht wat dit voor gevolgen heeft voor de testopstelling en hoe deze theorie zich vertaalt naar de praktijk. Bouwfysica is de natuurkunde binnen de bouwsector en daarbinnen wordt gefocust op hoe men deze kan controleren en regelen om behaaglijke klimaten te creëren binnen bouwwerken. Het interne klimaat verschilt daarbij van het klimaat extern. Dit deelonderzoek behandelt de interne en externe klimaten en wat deze voor invloed hebben op het dampdiffusie op en bouwen. Tevens is een simulatie ontwikkeld die als voorbeeld genomen kan worden bij het uitvoeren van testen binnen de testopstelling.

2. Dampdiffusie open bouwen

Een dampdiffusie open systeem houdt in dat het vocht dat binnen in het gebouw in de lucht zit, door de constructie naar buiten getransporteerd kan worden. Dit transport gebeurt bij de wisseling van temperaturen en is afhankelijk van de dampspanning. Dit transport is meestal naar buiten gericht. (Meerkerk & Vries, 2016). Een groot aantal biobased isolatiemateriaal hebben als eigenschap dat deze een vochtregulerend vermogen hebben. Dat houdt in dat deze zelfstandig gemakkelijk vocht (damp) kan opnemen en weer afstaan. (Prinsen, Bouwen met biobased materialen, 2016). De richting en het transport van deze damp wordt bepaald door het verschil tussen de interne en externe dampspanning. De dampspanning wordt bepaald door de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid, waarbij bij hogere temperaturen ook hogere dampspanningen behaald kunnen worden. De kans dat, in Nederland, de dampspanning binnen hoger is dan buiten is groot. Indien er geen scheidingselement aanwezig is zal de vochtigheid zich verplaatsen om evenwicht te creëren tussen de verschillende dampspanningen. Echter bij een bouwwerk is deze scheiding wel aanwezig en zorgt ervoor dat dit proces vertraagd wordt (Prinsen, Dampopen bouwen doe je zo, 2015). *"Belangrijk is dat alle naden goed luchtdicht gemaakt dienen te worden. De binnenlucht mag niet via kieren in de gevelconstructie terecht komen (deze kan daar namelijk condenseren op relatief koudere oppervlakten)."* (Bos, 2014). Belangrijk is dat er geen dampdichte delen en de juiste folies worden toegepast.

2.1. Vochtige lucht

"Waar lucht is, is ook vocht. Vaak onzichtbaar, in dampvorm aanwezig." (Meerkerk & Vries, 2016). Dit citaat beschrijft het feit dat er zich nagenoeg overal vocht bevindt, zelfs in de lucht. Hierom bevindt vocht zich ook binnen in woningen en gevels. Indien dit vocht niet afgevoerd wordt kan dit voor problemen zorgen voor zowel het binnenklimaat als voor de woning zelf. Lucht met hoge temperaturen bevat meer vocht dan lucht met lagere temperaturen. *"Vochtige lucht is op zichzelf niet zo'n probleem, maar het vormt een voedingsbodem voor schimmels en huisstofmijt. De gevolgen daarvan zijn inmiddels bekend: allergieën, luchtwegproblemen, astma, chronische verkoudheid et cetera."* (VROM, 2006).

2.2. Ventileren en energiebesparing

Een gezond leefklimaat creëren in een gebouw kan onder andere door goed te ventileren. Echter schijnt het een tegenstrijd te hebben met de energiebesparing, doordat er opgewarmde lucht afgevoerd wordt. Toch is dit niet geheel het geval, omdat vochtige lucht langzamer opwarmt dan droge lucht. Hierom heb je meer energie nodig om de vochtige lucht op te warmen ten opzicht van de droge lucht. (VROM, 2006) Het opwarmen van een dampdiffusie open gebouw is vergelijkbaar met een zeeklimaat waar onder andere Nederland zich in begeeft. Dit met betrekking tot de vochtigheid van de lucht, waarbij vochtige lucht moeizamer opgewarmd kan worden ten opzichte van droge lucht. Tevens houdt de vochtige lucht de warmte langer vast die deze vervolgens langer uit kan stoten. Dit is vergelijkbaar met het effect dat een zeeklimaat in tegenstelling tot een binnenlandsklimaat, waarbij het klimaat sneller opwarmt en koelt. (VROM, 2006) (Wikipedia, 2016) (Groenhart houtskeletbouw, 2015).

2.3. Bepaling dampdiffusie open bouwen

Om dampdiffusie open gevelconstructies te kunnen testen dient eerst een duidelijker beeld gecreëerd te worden van wat dampdiffusie open bouwen verder inhoud en aan welke randvoorwaarden een dampdiffusie open gevel aan dient te voldoen. Hierop volgend zijn punten uit genoemd afkomstig uit verschillende deskundige bronnen. Door deze verschillende bronnen met elkaar te vergelijken kan worden geconcludeerd wat de bepalende randvoorwaarden zijn van dampdiffusie open bouwen.

- Constructies dienen hoge prestatie op luchtdichtheid te hebben.
- Constructies dienen een isolerende werking te hebben.
- Constructies dienen aan de buitenzijde winddicht te zijn om drukverschillen te voorkomen in de constructie.
- De dampdiffusieweerstand aan de binnenzijde dient hoger te zijn dan aan de buitenzijde.
- In de constructie mag geen ophoping van vocht aanwezig zijn.

(Prinsen, Dampopen bouwen doe je zo, 2015)

- Damptransport naar buiten, waarbij de winterperiode cruciaal is. De binnenste laag dient meer dampwerend te zijn dan buitenste laag.
- Kierdichting is cruciaal bij dampopen bouwen.
- Isolatielaag dient bestendig te zijn tegen vocht en heeft een vochtregulerend vermogen (vochtbuffer). Hierbij is het belangrijk dat de Rc-waarde van het isolatie materiaal niet vermindert door het vochtregulerend vermogen.

(Kuindersma, 2017), (Kuindersma, 2013)

- Dampremmende folies niet toepassen.
- De gevelopbouw is zodanig ontworpen dat er geen inwendige condensatie kan plaatsvinden.
- De materiaallagen aan de buitenzijde (spouwzijde) van de wand dienen voldoende dampdoorlatend te zijn.
- Isolatie materiaal dient een vochtregulerend vermogen te hebben, waarbij het belangrijk is dat deze vocht kan opnemen en afgeven.

(SKH, 2012)

- Koudebruggen dienen voorkomen te worden.
- De binnenzijde dient niet 'dichtgesmeerd' te worden met een dampdiffusie dichte laag.
- Isolatie materialen dienen een vochtregulerend vermogen te bevatten, waarbij het materiaal gemakkelijk vocht kan opnemen en weer afstaan.
- Gevelconstructie dient naar buiten toe steeds meer dampopen te zijn.

(Prinsen, Bouwen met biobased materialen, 2016)

Dampdiffusiedicht bouwen is uitsluitend te realiseren met materialen zonder poriën, waar vochttransport in plaats kan vinden in de vorm van dampdiffusie. Materialen die in tegenstelling dampdicht zijn, bevatten een dampdiffusieweerstandcoëfficiënt (μ -waarde) die 'oneindig' is. Hieronder vallen onder andere glas, schuimglas, metalen, graniet, basalt, hardsteen en marmer (Architecten Gilde), (Bouwcentrum advies).

In de kennispaper: Dampopen bouwen doe je zo van SBRCURnet (Prinsen, Bouwen met biobased materialen, 2016), is weergegeven dat er geen vochtophoping aanwezig mag zijn in een dampdiffusie open constructie. Dit vertaalt zich in de praktijk naar dat het door de gevel opgenomen vocht, op jaarbasis, volledig afgegeven dient te worden. Er mag dus op jaarbasis geen vocht (damp) overblijven in de gevelconstructie. Indien dit zich wel voordoet, zal de hoeveelheid vocht van het herhaaldelijk proces toenemen. Dit kan uiteindelijk tot onder andere vochtschade leiden. Voor dit onderzoek heeft dit als gevolg dat in de testopstelling een klimaat simulatie nagebootst dient te worden die uitgaat van een jaar als cyclus, waarbij geen vochtophoping zich mag voordoen.

3. Klimatologie in Nederland

Uit gesprek met dhr. P. Kuindersma op 27 februari is naar voren gekomen dat er drie factoren zijn die gecontroleerd dienen te worden om een simulatie tot stand te brengen met betrekking tot het testen van een dampdiffusie open constructie. Dit zijn de factoren; temperatuur, relatieve luchtvochtigheid & dampspanning. Voor een correcte simulatie dient de praktijk nagebootst te worden.

Het klimaat binnen een woning is nagenoeg een constante, waarbij men er van uit gaat dat de ruimte als behaaglijk wordt bevonden. Volgens de website van 'Gemiddeld gezien', bevindt de gewenste kamertemperatuur in Nederland zich tussen de 18°C en 25°C. Het externe klimaat kan niet geregeld worden en zijn we afhankelijk van het weer. Het klimaat verschilt wereldwijd en kan temperaturen bevatten tussen de -74,5°C en 56,7°C (Stipanova, 1958), (Nelson, 2001). In Nederland zijn deze temperaturen minder extreem. De temperaturen in Nederland kunnen verschillen tussen de -27,4°C en 38,6°C (Meteoschoonebeek). Dit zijn de meest extreme temperaturen die in Nederland zijn gemeten. Deze temperaturen komen normaliter gezien niet voor, en de gemiddelde temperaturen zijn milder. De klimaatatlas van het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) geeft een gemiddelde temperatuur per maand weer (zie Figuur 1).

"Moisture is a very complex process and the knowledge of moisture transfer mechanisms, material properties, initial conditions and boundary conditions is often limited. Therefore this International Standard lays down simplified calculation methods, which assume that moisture transport is by vapour diffusion alone and use monthly climate data." – NEN-EN-ISO 13788: 2013 (Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut). Dit citaat afkomstig uit ISO 13788: 2013 toont aan dat in de normen gebruik wordt gemaakt van maandelijkse waarden voor het klimaat. Deze methode zal worden terug gebracht in de simulaties van de testopstelling.

Gemiddelde temperatuur (Celsius)

tijdvak 1981-2010

Locatie	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	W	L	Z	H	jaar	**
210 Valkenburg	3.6	3.6	6.1	8.7	12.5	15.1	17.4	17.5	14.8	11.3	7.4	4.3	3.9	9.1	16.7	11.2	10.2	30
235 De Kooy	3.5	3.3	5.6	8.4	12.0	14.7	17.1	17.4	15.0	11.4	7.5	4.4	3.8	8.7	16.4	11.3	10.0	30
240 Schiphol	3.4	3.5	6.1	9.1	12.9	15.4	17.6	17.5	14.7	11.0	7.1	4.0	3.7	9.4	16.8	10.9	10.2	30
249 Berkhout	3.2	3.3	5.7	8.8	12.7	15.1	17.5	17.4	14.6	11.0	7.0	3.9	3.5	9.0	16.7	10.8	10.0	29
251 Hoorn (Terschelling)	3.2	3.0	5.2	8.0	11.6	14.3	16.9	17.1	14.7	11.0	7.2	4.1	3.5	8.3	16.1	11.0	9.7	30
260 De Bilt	3.1	3.3	6.2	9.2	13.1	15.6	17.9	17.5	14.5	10.7	6.7	3.7	3.4	9.5	17.0	10.6	10.1	30
265 Soesterberg	2.9	3.0	5.9	8.9	13.0	15.5	17.7	17.4	14.4	10.6	6.4	3.7	3.2	9.3	16.9	10.5	10.0	27
267 Stavoren	2.8	2.6	5.3	8.6	12.6	15.2	17.7	17.7	14.9	11.0	6.8	3.3	2.9	8.8	16.9	10.9	9.9	28
269 Lelystad	2.7	2.9	5.7	8.9	12.9	15.3	17.5	17.3	14.4	10.6	6.5	3.4	3.1	9.2	16.7	10.5	9.8	30
270 Leeuwarden	2.7	2.7	5.3	8.2	12.0	14.6	17.0	16.9	14.2	10.5	6.5	3.3	3.0	8.5	16.2	10.4	9.5	30
273 Marknesse	2.6	2.8	5.6	8.9	12.8	15.2	17.4	17.2	14.2	10.3	6.3	3.2	2.9	9.1	16.6	10.3	9.7	30
275 Deelen	2.4	2.7	5.6	8.9	13.0	15.5	17.8	17.3	14.2	10.3	6.1	3.0	2.8	9.2	16.9	10.2	9.7	30
279 Hoogeveen	2.3	2.6	5.3	8.7	12.7	15.2	17.3	17.0	13.9	10.1	6.0	2.8	2.7	8.9	16.5	10.0	9.5	29
280 Elde	2.4	2.4	5.2	8.4	12.3	14.9	17.1	16.9	13.8	10.0	6.0	2.9	2.6	8.6	16.3	9.9	9.3	30
283 Hupsel	2.3	2.5	5.7	8.9	13.1	15.6	17.8	17.2	14.1	10.3	6.1	3.0	2.6	9.2	16.9	10.2	9.7	28
286 Nieuw Beerta	2.3	2.7	5.3	8.7	12.2	14.9	17.4	17.4	14.2	9.8	6.0	2.4	-	8.7	16.6	10.0	9.5	20
290 Twenthe	2.3	2.6	5.6	8.9	12.9	15.4	17.6	17.1	14.0	10.2	6.0	2.9	2.7	9.1	16.7	10.1	9.6	30
310 Vlissingen	4.0	4.0	6.4	9.2	12.9	15.6	18.0	18.2	15.8	12.2	8.1	4.9	4.4	9.5	17.3	12.0	10.8	30
319 Westdorpe	3.5	3.8	6.6	9.3	13.1	15.5	17.7	17.5	14.6	11.0	7.0	4.1	3.9	9.7	16.9	10.9	10.3	30
323 Wilhelminadorp	3.8	3.9	6.6	9.4	13.1	15.6	17.9	17.9	15.2	11.5	7.5	4.4	4.1	9.7	17.1	11.4	10.6	29
344 Rotterdam	3.6	3.7	6.4	9.1	12.9	15.5	17.8	17.6	14.8	11.2	7.3	4.2	3.9	9.5	17.0	11.1	10.4	30
348 Cabauw	3.5	3.9	6.4	9.2	13.2	15.6	17.8	17.6	14.6	10.8	6.7	3.5	3.7	9.6	17.0	10.7	10.2	23
350 Gilze-Rijen	3.1	3.3	6.3	9.3	13.3	15.8	18.0	17.6	14.6	10.8	6.6	3.7	3.4	9.6	17.2	10.7	10.2	30
356 Herwijnen	3.1	3.5	6.2	9.3	13.1	15.8	18.1	17.6	14.5	10.5	6.6	3.2	-	9.5	17.2	10.5	10.1	20
370 Eindhoven	3.0	3.3	6.3	9.5	13.5	16.0	18.2	17.7	14.6	10.8	6.6	3.6	3.3	9.8	17.3	10.6	10.3	30
375 Volkel	2.8	3.1	6.1	9.3	13.4	16.0	18.1	17.6	14.4	10.6	6.4	3.4	3.2	9.6	17.2	10.5	10.1	30
380 Maastricht	2.7	3.1	6.3	9.3	13.5	16.2	18.4	18.0	14.7	10.9	6.4	3.5	3.1	9.7	17.5	10.6	10.2	30
391 Arcen	2.7	3.0	6.2	9.4	13.6	16.1	18.4	17.7	14.4	10.6	6.3	3.3	3.1	9.7	17.4	10.5	10.2	30

Figuur 1: klimaatatlas 1981 - 2010 normalen AWS (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut)

S. Uittenbosch toont in zijn onderzoek naar de 'risico's van inwendige condensatie in externe scheidingsconstructies' verschillende manieren om het buitenklimaat te bepalen zoals in Tabel 1. Een mogelijke uitgangssituatie gegeven voor het buitenklimaat, is afkomstig uit de NEN-EN 13788. S. Uittenbosch beweert dat deze methode gebruikt kan worden indien de locatie niet bekend is. Indien de locatie wel bekend is kan deze informatie verkregen worden door eigen metingen te verrichten met behulp van NEN-EN-ISO 15927-1 of door data van onder andere het KNMI. Voor het binnenklimaat kan gebruik gemaakt worden van onder andere binnenklimaatklassen (Uittenbosch, 2012).

	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Te [°C]	2,4	2,8	4,5	6,7	9,8	12,6	14,0	13,7	11,2	9,0	5,0	3,5
Rv [%]	92	88	85	80	78	80	82	84	87	89	91	92

Tabel 1: gemiddelde buitenklimaat, NEN-EN 13788

Er is geen locatie bekend om metingen uit te voeren voor het bepalen van het buitenklimaat. Echter is de data van het KNMI nader onderzocht om een landelijk maangemiddelde te bepalen. Er is een keuze gemaakt om het klimaat binnen Nederland te bestuderen en het internationale gebied buiten beschouwing te laten met betrekking tot het bepalen van een simulatie. Deze keuze is gemaakt in overleg met de opdrachtgever, waarin is besloten om de klimaat focus op Nederland te houden. Hierbij worden temperaturen gebruikt van -15°C tot en met 40°C (Peutz) en deze kunnen naderhand uitgebreid worden indien nodig. Tevens is deze keuze gemaakt omdat klimaten wereldwijd verschillen en er binnen dit onderzoek een werkwijze getoond dient te worden die als voorbeeld gebruikt kan worden. In [paragraaf 3.1](#) is nader omschreven wat er nodig is om de juiste internationale simulatie te krijgen.

3.1. Temperaturen, internationaal

Temperaturen verschillen internationaal sterk met die van Nederland. Om een enkele simulatie te maken die alle gebieden wereldwijd dekt is nagenoeg onmogelijk, omdat het damptransport afhankelijk is van de temperatuur intern, extern en van de heersende dampspanningen. Om een realistische indicatie te krijgen of een gevelconstructie dampdiffusie open is dient het klimaat van het desbetreffende gebied op jaarbasis

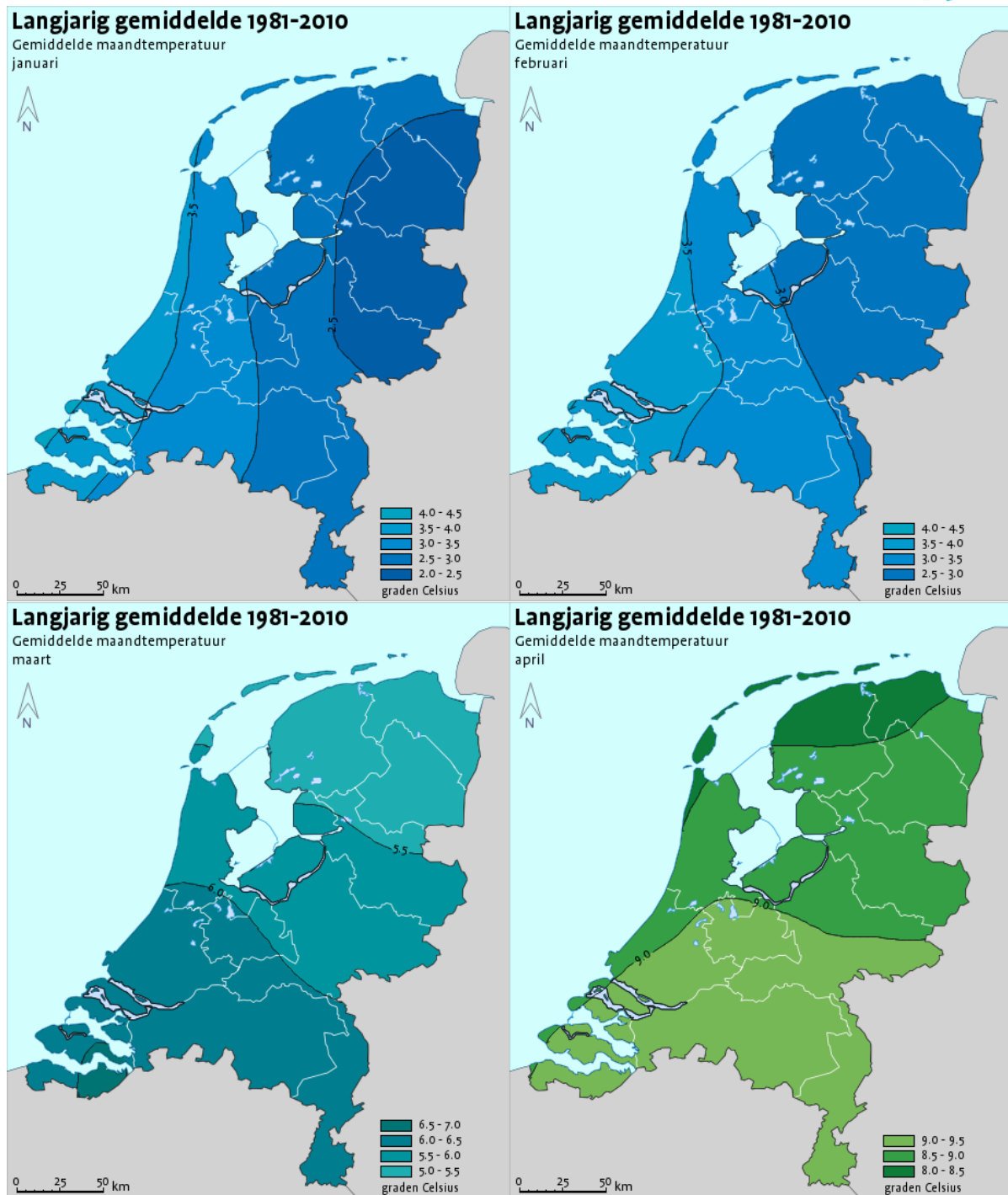
bekeken te worden. Gelieve dit te doen over langere periode om uitschieterende waarden te vermijden. Deze uitschieterende waarden kunnen een grote invloed hebben op de simulatie terwijl deze zeldzaam zijn. In paragraaf [2.4. KNMI klimatologie](#) is aangegeven dat de temperaturen wereldwijd hoger/lager kunnen zijn dan in Nederland. Indien er een simulatie gewenst is voor internationale gebieden is het belangrijk dat de testopstelling wel de capaciteit heeft om deze temperaturen te behalen. Om de juiste simulatie te krijgen dient gekeken te worden naar het klimaat per gebied, wat wereldwijd verschillend is.

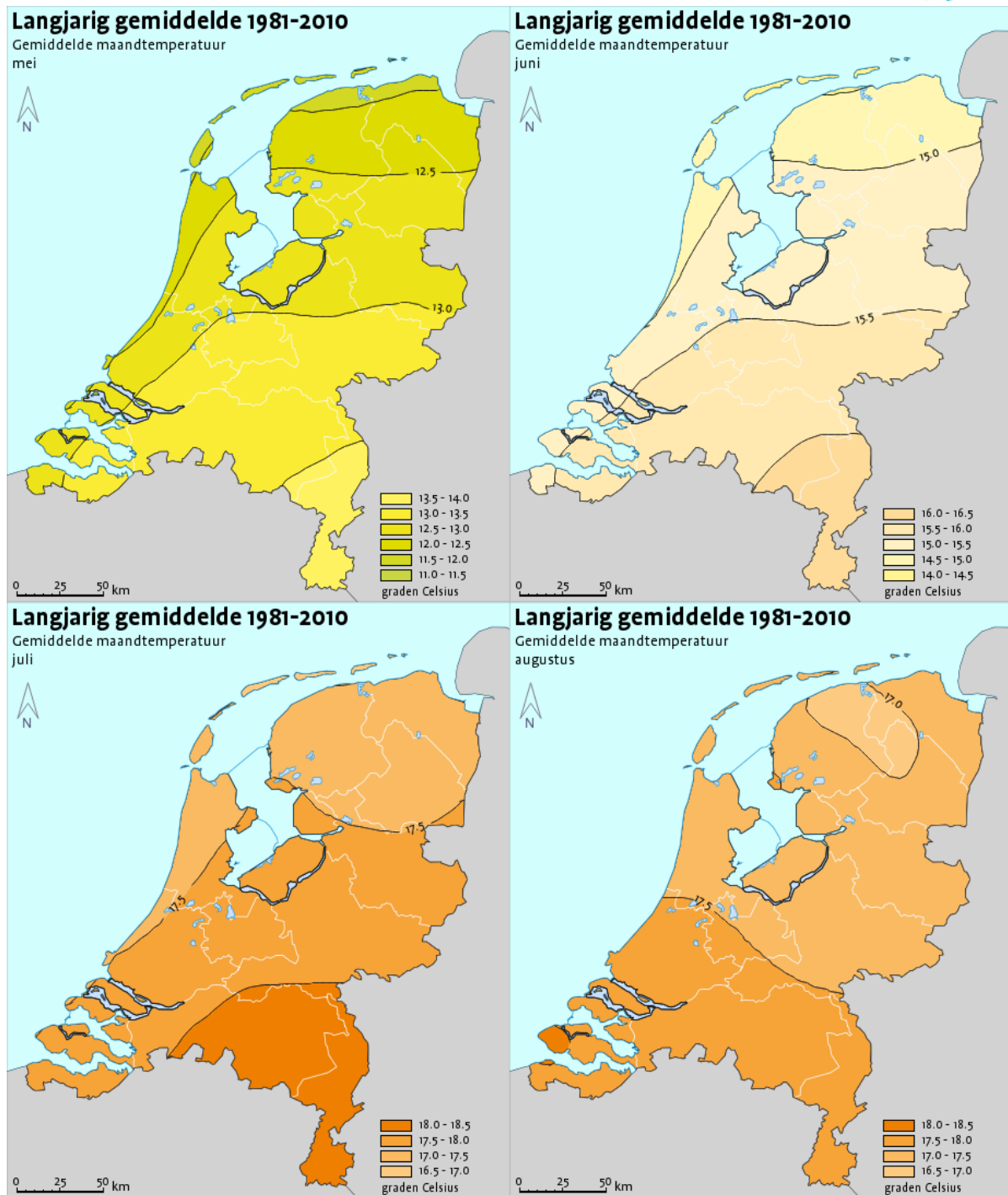
3.2. Temperaturen, Nederland

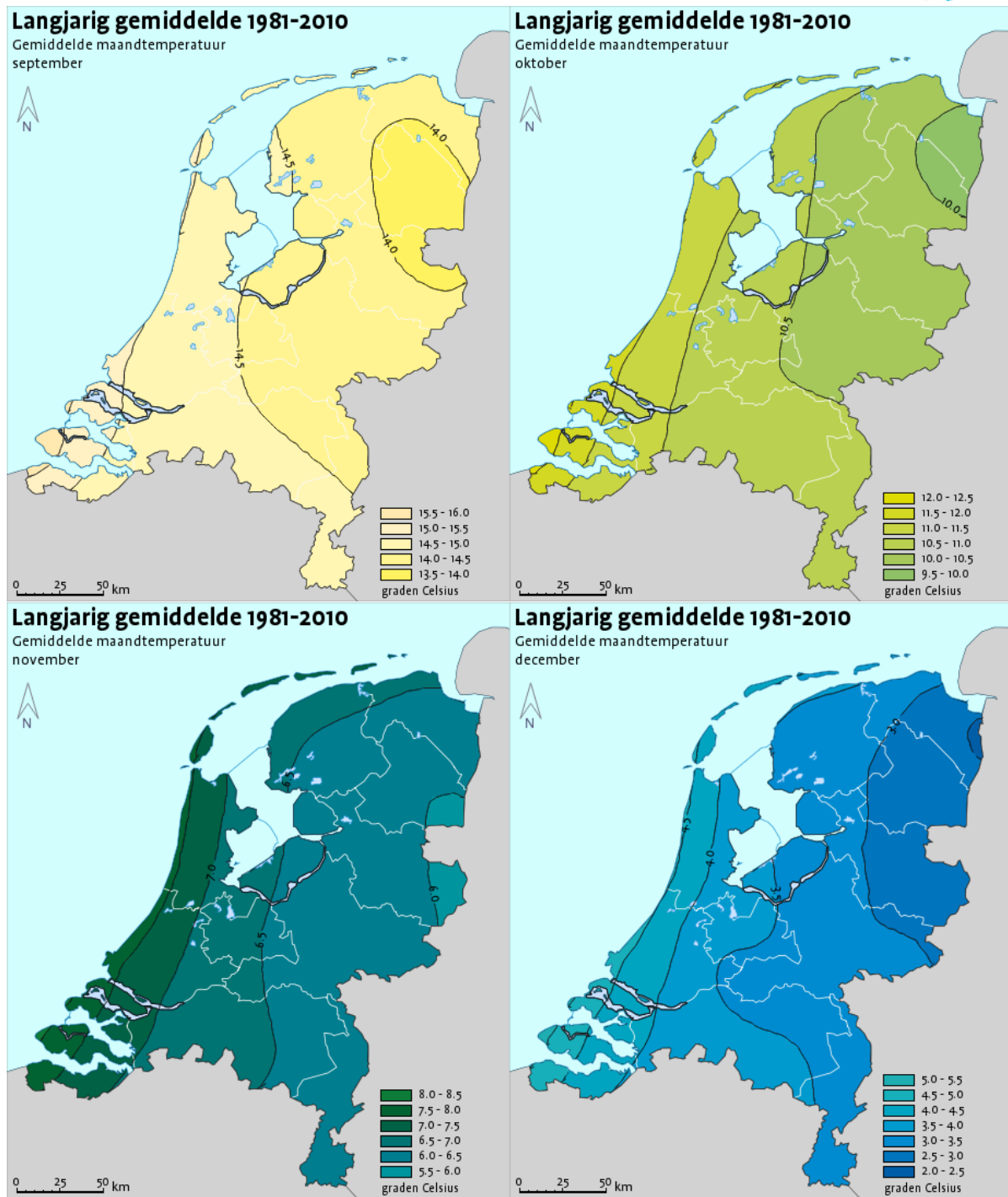
Het KNMI geeft gegevens op verschillende manieren. Eén daarvan is de klimaatatlas, die het klimaat beschrijft in de periode 1981-2010. Figuur 2 toont meerdere afbeeldingen waarin de maandgemiddelde temperaturen uit de klimaatatlas worden weergegeven per gebied. In deze afbeeldingen is waar te nemen dat er een verschil is in temperatuur tussen binnenlandse gebieden en kustgebieden, maar ook ten opzichte van noord en zuid Nederland. De klimaatatlas beschrijft de gemiddelde maandtemperaturen in Nederland over de periode 1981-2010 (zie Figuur 1). In combinatie met de waarden, die in de jaaroverzichten van 2009 tot en met 2016 worden gegeven, kan een actuele gemiddelde temperatuur worden bepaald die in Nederland heerst (zie Tabel 2). In dit onderzoek heeft dit als gevolg dat deze maandgemiddelde temperaturen vertaald kunnen worden naar een externe simulatieprogramma die gebruikt kan worden in de testopstelling.

jaar	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
2009	1.0	3.1	6.1	11.7	13.5	15.4	18.0	18.7	15.4	10.0	9.5	2.6
2010	-0.5	1.4	5.9	9.2	10.3	16.0	19.6	16.8	13.9	10.8	5.9	-0.8
2011	3.4	4.4	5.9	12.6	13.9	16.0	15.8	16.9	15.8	11.7	7.6	6.3
2012	4.8	0.6	7.8	8.2	13.7	14.8	17.1	18.5	14.5	10.7	7.1	4.9
2013	2.1	1.6	2.2	7.8	11.1	14.7	18.9	18.2	14.6	12.5	7.1	6.1
2014	5.5	6.4	8.2	11.6	13.3	16.0	19.5	16.3	16.3	13.6	8.4	5.1
2015	4.1	3.6	6.2	8.8	12.1	15.3	18.2	18.6	13.7	10.4	10.0	9.5
2016	4.7	4.7	5.4	8.5	14.1	16.3	18.2	18.1	17.9	10.4	6.1	5.1
Gemiddelde	3,1	3,2	6,0	9,8	12,8	15,6	18,2	17,8	15,3	11,3	7,7	4,9
Klimaatatlas	3,0	3,1	5,9	8,9	12,9	17,1	17,7	17,5	14,5	10,4	6,6	3,6
Gemiddelde	3,1	3,2	6,0	9,4	12,9	16,4	18,0	17,7	14,9	10,9	7,2	4,3

Tabel 2: maandgemiddelde temperaturen jaaroverzichten, bron data: KNMI



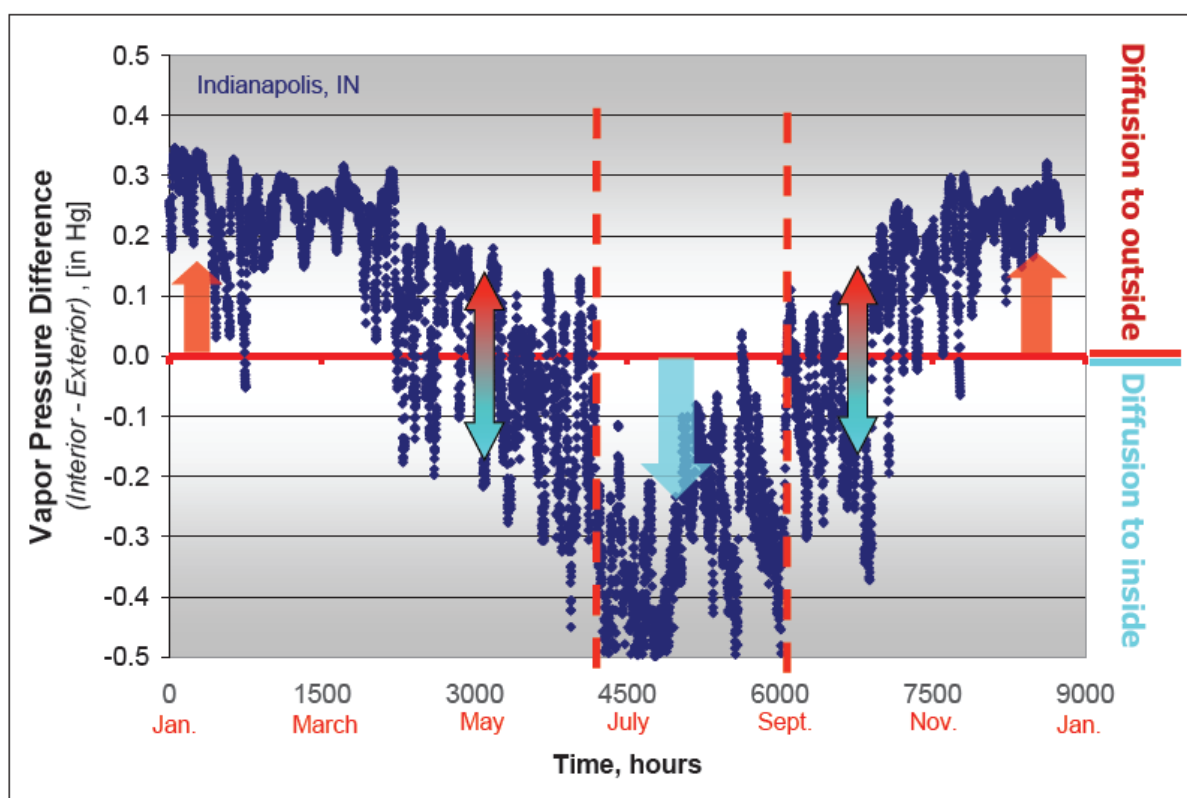




Figuur 2: klimaatatlas KNMI gemiddelde maandtemperaturen 1981-2010

3.2. Dampspanning & relatieve luchtvochtigheid, Nederland

Dat de temperatuur bepalend is, is eerder beschreven in [hoofdstuk 3 KNMI klimatologie](#). De temperatuur heeft tevens invloed op de dampspanning en een verschil daarin heeft tevens weer invloed op de richting van het damptransport. Door de verschillen kan de richting van het damptransport zowel naar binnen als naar buiten verlopen (zie Figuur 3). In [paragraaf 2.3 randvoorwaarden](#) is aangegeven dat in een dampdiffusie open gevelconstructie er geen vochtophoping zich mag voordoen. Het verloop van dampspanning in Nederland zal verschillen ten opzichte van Figuur 3, omdat Nederland op een hogere breedtegraad ligt dan Indianapolis, VS. Tevens heerst in Indianapolis een ander klimaat, dat deze grafiek ook beïnvloedt. Figuur 3 is hier weergegeven om het principe van damptransport met betrekking tot het klimaat te tonen.



Figuur 3: dampspanningsverschil; Maria Spinu, DuPont Building Innovations (Spinu, 2012).

Tabel 3 toont de gemiddelde dampdruk per maand in Nederland die is berekend naar aanleiding van de gegevens weergegeven in Figuur 4: klimaatatlas 1981-2010 normalen AWS. Tabel 4 toont de gemiddelde relatieve vochtigheid per maand in Nederland die is berekend naar aanleiding van de gegevens weergegeven in Figuur 5. De relatieve vochtigheid is een gevolg van de verhouding tussen de dampdruk en de verzadigingsdampdruk (Buishand & Velds). Deze bouw fysieke termen worden nader toegelicht in deelrapport 2: Thermohygrische eigenschappen. In dit onderzoek heeft dit als gevolg dat de maandgemiddelde relatieve vochtigheden weergegeven in Tabel 4 vertaald kunnen worden naar een externe simulatieprogramma die gebruikt kan worden in de testopstelling.

Gemiddelde dampdruk (hPa)													tijdvak 1981-2010					
Locatie	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	W	L	Z	H	jaar	**
210 Valkenburg	7.1	6.9	8.0	9.0	11.3	13.5	15.8	15.9	14.0	11.4	9.1	7.5	7.2	9.4	15.0	11.5	10.8	30
235 De Kooy	7.1	6.9	7.8	9.0	11.3	13.4	15.8	15.9	14.0	11.5	9.1	7.6	7.2	9.4	15.0	11.5	10.8	30
240 Schiphol	7.1	6.9	8.0	8.9	11.2	13.6	15.8	15.8	14.0	11.5	9.2	7.6	7.2	9.4	15.0	11.6	10.8	30
249 Berkhout	7.0	6.8	7.8	9.0	11.3	13.6	15.8	15.9	14.0	11.4	9.0	7.4	7.1	9.4	15.1	11.5	10.7	29
251 Hoorn (Terschelling)	6.9	6.8	7.7	8.9	11.1	13.3	15.7	15.9	13.9	11.5	9.0	7.4	7.1	9.2	15.0	11.5	10.7	27
260 De Bilt	6.9	6.7	7.8	8.7	11.1	13.5	15.6	15.6	13.8	11.3	9.0	7.3	7.0	9.2	14.9	11.4	10.6	30
265 Soesterberg	6.9	6.6	7.6	8.4	10.9	13.1	15.1	15.2	13.5	11.2	8.8	7.4	7.0	9.0	14.5	11.2	10.4	27
269 Lelystad	6.9	6.8	7.9	8.9	11.3	13.8	16.0	15.9	14.1	11.5	9.0	7.4	7.1	9.4	15.3	11.5	10.8	29
270 Leeuwarden	6.9	6.7	7.7	8.8	11.1	13.4	15.6	15.6	13.8	11.2	8.9	7.3	7.0	9.2	14.9	11.3	10.6	30
273 Marknesse	7.0	7.1	8.0	9.1	11.3	13.9	16.2	16.1	14.0	11.3	9.1	7.2	-	9.5	15.4	11.5	10.9	20
275 Deelen	6.7	6.5	7.5	8.3	10.8	13.1	15.1	15.0	13.4	11.0	8.7	7.1	6.8	8.9	14.4	11.0	10.3	30
279 Hoogeveen	6.7	6.6	7.6	8.5	10.9	13.4	15.5	15.4	13.5	11.0	8.7	7.1	6.9	9.0	14.8	11.1	10.4	29
280 Elde	6.8	6.7	7.6	8.7	11.1	13.5	15.8	15.7	13.7	11.1	8.8	7.2	6.9	9.2	15.0	11.2	10.6	30
283 Hupsel	6.6	6.4	7.5	8.5	11.0	13.4	15.5	15.5	13.6	11.0	8.6	7.1	6.7	9.0	14.8	11.1	10.4	28
286 Nieuw Beerta	6.8	6.9	7.7	9.0	11.4	13.8	16.1	15.8	13.7	11.0	8.8	7.0	-	9.4	15.2	11.2	10.7	20
290 Twenthe	6.6	6.5	7.5	8.4	10.9	13.1	15.1	15.1	13.3	10.9	8.6	7.0	6.7	8.9	14.5	11.0	10.3	30
310 Vlissingen	7.3	7.1	8.1	9.1	11.6	13.8	16.1	16.2	14.4	12.0	9.6	7.8	7.4	9.6	15.4	12.0	11.1	30
319 Westdorpe	7.1	6.9	8.0	8.7	11.3	13.7	15.8	15.6	13.9	11.6	9.1	7.5	7.2	9.4	15.1	11.5	10.8	27
323 Wilhelminadorp	7.2	7.1	8.2	9.1	11.5	13.8	15.9	15.9	14.1	11.6	9.3	7.7	7.4	9.6	15.2	11.7	11.0	29
344 Rotterdam	7.2	7.0	8.1	9.0	11.4	13.8	15.9	15.9	14.1	11.6	9.3	7.6	7.3	9.5	15.2	11.7	10.9	30
350 Gilze-Rijen	7.0	6.8	7.8	8.7	11.1	13.4	15.4	15.3	13.6	11.3	9.0	7.4	7.1	9.2	14.7	11.3	10.6	30
356 Herwijnen	7.1	7.1	8.1	9.2	11.6	14.0	16.3	16.2	14.1	11.4	9.2	7.3	-	9.7	15.5	11.5	11.0	20
370 Eindhoven	6.9	6.7	7.8	8.6	11.2	13.3	15.4	15.4	13.6	11.2	8.9	7.4	7.0	9.2	14.7	11.2	10.5	30
375 Volkel	6.9	6.7	7.8	8.7	11.3	13.4	15.4	15.4	13.6	11.2	8.9	7.3	7.0	9.3	14.7	11.2	10.6	30
380 Maastricht	6.8	6.6	7.7	8.6	11.2	13.5	15.5	15.4	13.6	11.2	8.8	7.2	6.9	9.2	14.8	11.2	10.5	30
391 Arcen	6.7	6.6	7.6	8.6	11.2	13.5	15.6	15.6	13.7	11.2	8.7	7.1	6.8	9.1	14.9	11.2	10.5	29

Figuur 4: klimaatatlas 1981-2010 normalen AWS (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut)

	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Jaargem.
	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]	[hPa]
Gemiddelden	6,7	6,8	7,8	8,8	11,2	13,5	15,6	15,1	13,8	11,3	9,0	7,3	10,6

Tabel 3: gemiddelde dampdruk per maand in Nederland, totaal aantal weerstations, klimaatatlas 1981-2010

Gemiddelde relatieve vochtigheid (procent)													tijdvak 1981-2010					
Locatie	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	W	L	Z	H	jaar	**
210 Valkenburg	86	84	83	79	78	79	80	80	83	84	87	87	86	80	79	84	82	30
235 De Kooy	88	86	85	81	80	80	80	80	82	84	86	88	87	82	80	84	83	30
240 Schiphol	88	86	83	78	76	78	79	80	83	86	89	90	88	79	79	86	83	30
249 Berkhout	88	85	84	79	78	79	79	81	84	86	88	89	87	80	80	86	83	29
251 Hoorn (Terschelling)	88	87	86	82	81	81	81	81	83	85	87	88	88	83	81	85	84	27
260 De Bilt	87	84	81	75	75	76	77	79	84	86	89	89	87	77	77	86	82	30
265 Soesterberg	87	84	81	75	74	76	76	77	83	86	89	90	87	77	76	86	81	27
269 Lelystad	90	87	84	78	77	79	81	82	86	88	91	92	89	80	81	88	84	29
270 Leeuwarden	89	87	85	80	80	80	81	82	85	87	90	91	89	82	81	87	85	30
273 Marknesse	90	89	85	78	77	80	81	82	86	89	92	92	-	80	81	89	85	20
275 Deelen	89	85	81	74	73	75	76	77	83	86	90	90	88	76	76	86	82	30
279 Hoogeveen	89	86	83	76	75	78	79	81	85	88	91	91	89	78	79	88	84	30
280 Elde	90	88	85	79	79	81	82	83	86	89	91	92	90	81	82	89	86	30
283 Hupsel	88	84	81	74	74	76	77	80	85	86	89	90	87	76	78	87	82	30
286 Nieuw Beerta	90	89	85	80	80	82	82	81	85	88	92	92	-	82	81	88	86	20
290 Twenthe	88	84	81	74	75	76	76	78	84	86	89	90	87	77	77	87	82	30
310 Vlissingen	87	85	83	78	78	78	78	78	80	83	87	88	86	80	78	83	82	30
319 Westdorpe	86	83	81	75	77	79	79	79	84	86	89	89	86	78	79	86	82	27
323 Wilhelminadorp	87	85	83	77	76	78	79	78	82	84	87	89	87	79	78	84	82	29
344 Rotterdam	88	85	83	78	77	79	79	80	84	86	89	89	87	79	79	86	83	30
350 Gilze-Rijen	88	84	81	75	74	75	76	77	82	86	89	90	87	77	76	86	82	30
356 Herwijnen	89	88	84	79	78	78	80	81	85	88	91	91	-	80	80	88	84	20
370 Eindhoven	87	84	80	74	73	75	75	77	83	85	89	90	87	76	76	86	81	30
375 Volkel	88	85	81	75	74	75	76	78	83	86	90	90	88	77	76	86	82	30
380 Maastricht	87	84	80	74	73	75	75	76	82	85	89	89	87	76	75	85	81	30
391 Arcen	86	83	79	73	74	75	76	78	84	86	89	88	86	75	76	86	81	29

Figuur 5: klimaatatlas 1981-2010 normalen AWS (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut)

	Jan	Feb	Mrt	Apr	Mei	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dec	Jaargem.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Gemiddelden	88	85	83	77	76	78	79	80	84	86	89	90	80,3

Tabel 4: gemiddelde relatieve vochtigheid per maand in Nederland, totaal aantal weerstations, klimaatatlas 1981-2010

3.3. Wind en zonlicht

Wind en zonlicht hebben beide een positieve werking op het proces bij het afstaan van damp uit de gevelconstructie dat overigens wel afhankelijk is van de gevelconstructie (Kuindersma, 2017). De stralingswarmte afkomstig van de zon verwarmt het geveloppervlak. In [paragraaf 3.2.](#) is aangegeven dat het klimaat invloed heeft op de damptransportrichting. Volgens Ing. G. H. Wegkamp kan dit op verschillende wijzen. Wegkamp maakt een verschil tussen land- en zeeklimaat en maakt de vergelijking tussen de Alpen en Nederland.

Landklimaat *"De houten huizen in bijvoorbeeld de Alpen zijn donker van kleur aan de buitenzijde, zodat ze beter de zonnewarmte opvangen. De buitenzijde wordt daarom erg warm. Als de zon in de morgen de buitenzijde opwarmt, draait de waterdampkring om. Waterdamp wil altijd naar een kouder gebied en dat is dan de binnenruimte. Op deze manier ging waterdamp niet verloren maar bleef in de woningen, waardoor binnen de relatieve luchtvochtigheid niet zo laag werd. Dampopen bouwen is dus in dit klimaat zeer zinvol."* - (Wegkamp, 2016).

Zeeklimaat *"In Nederland heerst een zeeklimaat. Minder koude winters, maar wel vochtige exemplaren met een veel minder sterke zon dan in de Alpen. Het terugdrogen van de constructie naar binnen in de woning wil daarom in ons land niet of zelden lukken. Ook is het gezien het hogere waterdampgehalte van de lucht in de winter niet noodzakelijk."* - (Wegkamp, 2016).

Zonlicht kan zorgen voor stralingswarmte waarbij de verhoogde temperatuur het vocht sneller zal laten verdampen. Dit heeft een positieve werking op het proces van vochtafvoer. Wind of luchtstroming (convectie) is een gevolg van luchtdrukverschillen. Lucht stroomt langs de gevel waardoor de damp afgevoerd wordt en tevens de temperatuur daalt aan het buitenoppervlak van de gevel. Hierdoor komt er sneller ruimte voor de damp in de gevel om zich naar de drogere (koudere) buitenlucht te verplaatsen. Indien de gevelconstructies in de testopstelling voldoet zonder invloeden van zonlicht en wind, is het hoogstwaarschijnlijk dat deze ook voldoen als deze factoren wel zijn meegerekend. Wind en zonlicht worden daarom in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

3.4. Binnenklimaat

Het gedrag van mensen heeft invloed op het binnenklimaat. Zo wordt er vocht geproduceerd door onder andere handelingen als de was doen, koken en menselijke transpiratie. Deze verschillende vochtbronnen zorgen voor vochttoevoer binnen een gebouw. Daarentegen is er ook sprake van vochtafvoer door onder andere dampdiffusie, openingen en ventilatie (Hasselaar, 2015). Het binnenklimaat is dus van vele aspecten afhankelijk. Paragraaf 3.3. omschrijft dat de factor 'wind' buiten beschouwing gelaten wordt. Dit geldt eveneens voor de luchtstroom in het binnenklimaat, omdat de lucht in het binnenklimaat voor een groot percentage afgevoerd wordt door middel van een ventilatie systeem. Het is momenteel nog discutabel tot in hoeverre dampdiffusie open bouwen invloed heeft op de vochtafvoer binnen een bouwwerk. Echter gaat dit onderzoek niet in op deze discussie en richt het zich op het ontwikkelen van een testopstelling om dampdiffusie open gevelconstructies te testen. Om de juiste simulatie te kunnen creëren voor het binnenklimaat dienen de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid op de juiste comfortabele waarden gezet te worden. Een comfortabel binnenklimaat is afhankelijk van de functie van het gebouw en de activiteiten die plaatsvinden binnen de ruimte. Tevens is de binnen temperatuur afhankelijk van de buitentemperatuur verschild dit per persoon (Kurvers, van der Linden, & H., 2012). Volgens onderzoek dat het WTCB heeft uitgevoerd is naar voren gekomen dat er slechts 3% aan vocht via diffusie een bouwwerk verlaat. 90% wordt via ventilatie afgevoerd en 7% gaat via luchtlekken (Tilmans & De Mets, 2017). Het is

daarom onwaarschijnlijk dat dampdiffusie open bouwen ventilatie systemen kunnen vervangen. Echter dient de focus van dampdiffusie open bouwen te liggen op het 'drogen' van gevelconstructie indien hier vocht in terecht komt. De website van NEN geeft aan dat uit onderzoek is gebleken dat de gemiddelde comfortabele temperatuur binnen een woning in Nederland op 19,7°C staat en dat vrouwen voor het merendeel de controle hierop hebben (NEN, 2013).

3.4.1. Binnenklimaatklassen

Een behaaglijk binnenklimaat kan gemakkelijk bepaald worden door middel van binnenklimaatklassen I tot en met IV (College van Deskundigen "Isolatiematerialen en Dakbedekkingen", 2013). Deze klimaatklassen gaan uit van de functie in een gebouw en de temperatuur en relatieve vochtigheid worden daarop aangepast (zie Tabel 5). Het enige dat deze klassen doen is het categoriseren van verschillende binnenklimaten. Het geeft een indicatie van welke temperaturen en relatieve vochtigheden aangehouden kunnen worden voor een bepaalde gebouwfunctie. Deze methode gaat uitsluitend uit van de functie en houdt echter geen rekening met een heersende buitentemperatuur.

Klimaatklasse (BKK)	Voorbeelden van gebruik ruimte	Optredende dampdruk in Pa	Temperatuur en relatieve vochtigheid
I	Opslagloodsen Garages Schuren	$1030 < P_1 \leq 1080$	18°C - 50 % tot 18°C - 52 %
II	Woningen Kantoren Winkels	$1080 < P_1 \leq 1320$	20°C - 46 % tot 20°C - 56 %
III	Scholen Verpleeginrichtingen Bejaardencentra Recreatiegebouwen	$1320 < P_1 \leq 1430$	22°C - 50 % tot 22°C - 54 %
IV	Wasserijen Zwembaden Drukkerijen	$P_1 > 1430$	24°C - 48 % en hoger

Tabel 5: binnenklimaatklassen in Nederland

3.4.2. De Methode Fanger

De methode Fanger wordt omschreven in NEN-EN-ISO 7730. Met deze methode kan voorspeld worden in hoeverre een gebouw als 'koud', 'neutraal' of 'warm' ervaren wordt door de gebruiker. De methode Fanger is vooral een methode om te bepalen of een ruimte als behaaglijk ervaren kan worden naar aanleiding van de volgende factoren:

- o warmteweerstand van de kleding;
- o activiteitsniveau (metabolisme) van de gebruiker;
- o luchttemperatuur;
- o gemiddelde stralingstemperatuur;
- o gemiddelde stralingstemperatuur;
- o gemiddelde stralingstemperatuur;

De gevonden waarden dienen kleiner dan -0,5 of groter dan +0,5 (PMV; Predicted Mean Vote) te zijn om aan de NEN-EN-ISO 7730 te voldoen. Echter bepaalt deze methode de behaaglijkheid naar aanleiding van

een ontworpen ruimte, wat in dit onderzoek niet het geval is. Hierbij wordt een behaaglijke binnentemperatuur gezocht in relatie tot een buitentemperatuur.

"Veldonderzoek heeft aangetoond dat de methode Fanger een overschatting geeft van de mate waarin men het te warm vindt in warmere omstandigheden en een onderschatting van de mate waarin men het koud heeft in relatief koude omstandigheden." - (Arbovakbase, 2015)

"De methode van Fanger geeft vooral een goede voorspelling van de gemiddelde thermische sensatie in gebouwen met een beperkte mate van gebruikersinvloed (gebouwen met airconditioning en een gesloten gevel)." - (Arbovakbase, 2015)

Concluderend kan worden gesteld dat de methode Fanger niet van toepassing is in dit onderzoek omdat deze voornamelijk uitgaat van een op voorhand bepaalde ruimte.

3.4.3. De GTO Methode

Deze methode is als het ware een toevoeging op de methode Fanger waarbij rekening gehouden wordt met een acceptabele overschrijden naar aanleiding van een weegurencriterium, dat is ontwikkeld door de Tijdgebouwendienst. Zoals genoemd in de methode Fanger worden een PMV van -0,5 en +0,5 geaccepteerd. Bij de Gewogen Temperatuur Overschrijding (GTO) methode wordt over het algemeen een overschrijding van 10% geaccepteerd. De GTO methode wordt vooral gebruikt bij het uitvoeren van computersimulaties om het gedrag van thermische behaaglijkheid binnen gebouwen te voorspellen (Arbovakbase, 2015).

3.4.4. De ATG methode

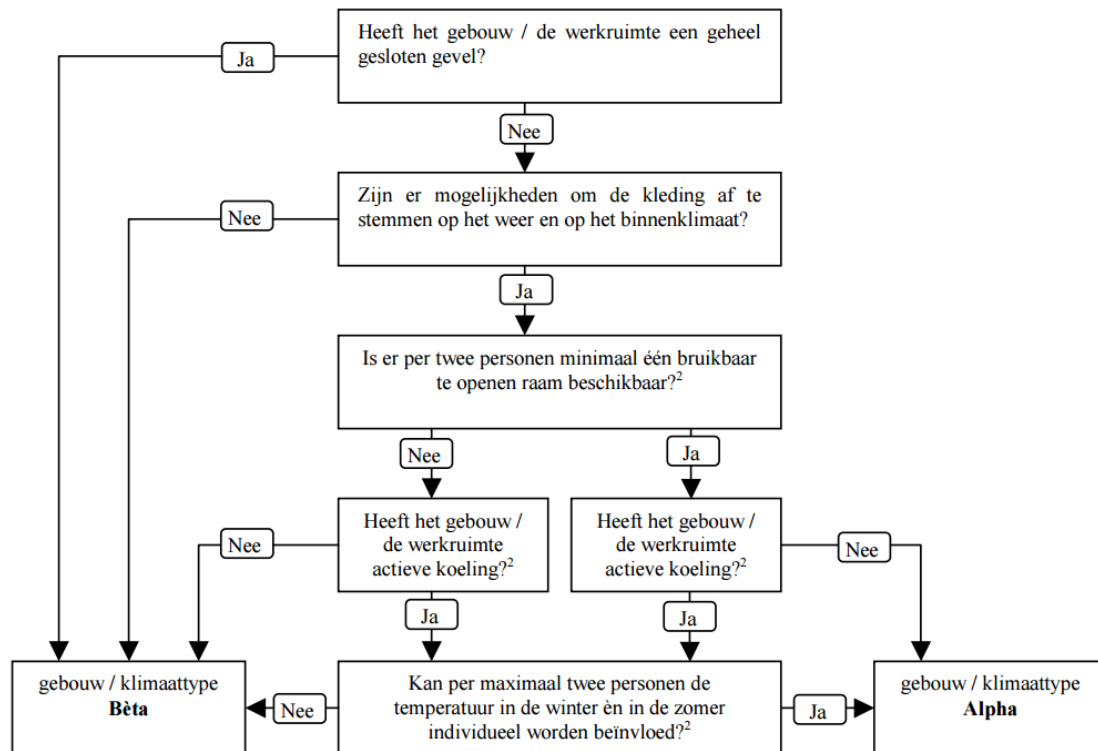
Om een breder perspectief te geven aan waar de temperatuur binnen op gesimuleerd kan worden, is het onderzoek Adaptieve Temperatuurgrenswaarden (ATG) door M. van Beek (2006) nader bestudeerd (Beek, 2006). Hieruit blijkt dat het binnenklimaat in kantoorgebouwen een gevolg is van het buitenklimaat. Een binnenklimaat is afhankelijk van vele factoren zoals; functie in een gebouw, eisen en wensen van de gebruiker en locatie & bijhorende buitenklimaat. De ATG is omschreven in ISSO-publicatie 74 (Kennisinstituut voor de installatiesector, 2014) en richt zich vooral op utiliteitsbouw en kantoren. Tevens is deze methode goed geschikt voor praktijkmetingen naar aanleiding van te hoge temperaturen in zomersituaties. Deze methode gaat uit van temperatuurgrenswaarden die zijn gebaseerd op veldonderzoek in tegenstelling tot de methode Fanger en GTO. Deze zijn gebaseerd op laboratoriumonderzoek. Deze twee methode zijn ook mogelijk om een behaaglijk binnenklimaat te bepalen (Arbovakbase, 2015).

In een veldonderzoek is aangetoond dat de methode Fanger een goede voorspelling doet voor de thermische behaaglijkheid als het aankomt op afgesloten ruimten met airconditioning. Echter voor natuurlijk geventileerde ruimten en passief gekoelde gebouwen blijken gebouwgebruikers een hogere tolerantie te accepteren bij hogere buitentemperaturen. Dit is tevens het gevolg van de mogelijkheid van het openen van ramen. Ook de vrijheid om kleding te veranderen speelt een rol bij een thermisch behaaglijk binnenklimaat. In het onderzoek van M. van Beek wordt onderscheid gemaakt in 'alpha' en 'bèta' kantoorgebouwen, waarbij 'alpha' gebouwen natuurlijk geventileerd zijn en de 'bèta' gebouwen uitgaan van dichte gevels (Arbovakbase, 2015). Figuur 6 geeft een model weer waarmee men bepaalt of een gebouw als alpha of bèta gedefinieerd kan worden. Naar aanleiding van die definitie kan in de grafieken weergegeven in

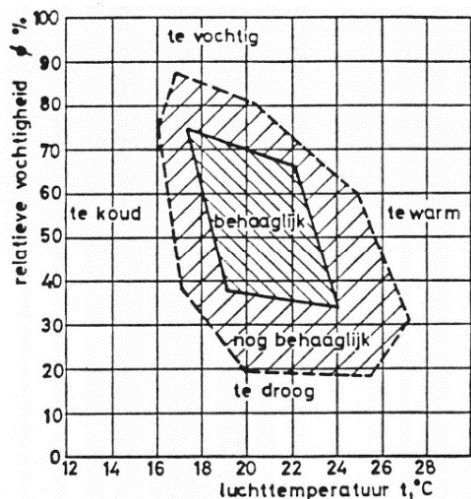
Figuur 8 en Figuur 9 de temperatuur bepaald worden voor het comfortabel binnenklimaat.

Het verschil tussen de alpha en bèta gebouw is afhankelijk van de buitentemperatuur. Tot circa 11°C à 12°C is de grafiek van alpha hetzelfde als die van bèta. Boven deze temperaturen stijgt de behaaglijke binnentemperatuur van een alpha gebouw sneller ten opzichte van een bèta gebouw.

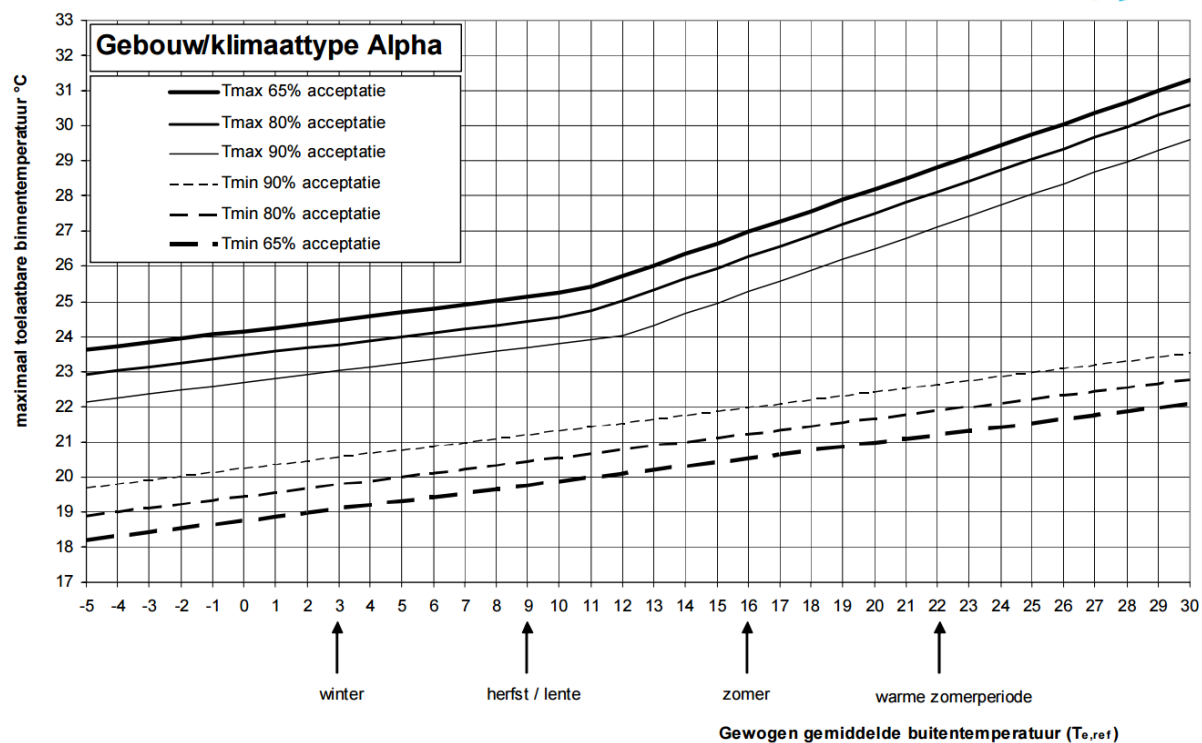
Nadat een behaaglijke binnentemperatuur is bepaald naar aanleiding van het ATG model van Marco van Beek (Figuur 6, Figuur 8 en Figuur 9), kan een gepaste relatieve luchtvochtigheid bepaald worden door middel van het model uit Figuur 7.



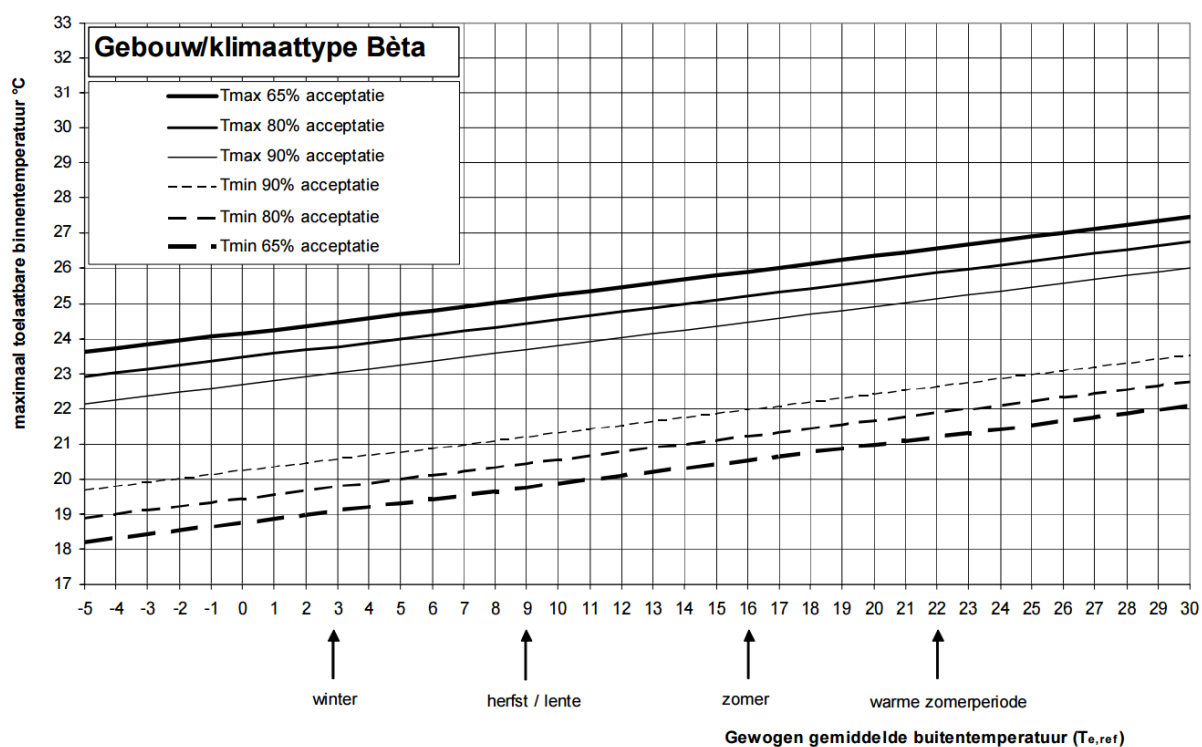
Figuur 6: Bepaling van het gebouw/klimaattype van een gebouw of ruimte, afhankelijk van de adaptatiemogelijkheden. Data bron; (Beek, 2006).



Figuur 7: relatie luchttemperatuur en luchtvochtigheid, (de Rotte, 1992).



Figuur 8: Gebouw/klimaatype Alpha. Maximaal toelaatbare operatieve binnentemperatuur voor een bepaalde acceptatie, afhankelijk van de buitentemperatuur $T_{e,ref}$. data bron Adaptieve temperatuurgrenswaarden (ATG), ISO 74 (Beek, 2006).



Figuur 9: Gebouw/klimaatype Bèta. Maximaal toelaatbare operatieve binnentemperatuur voor een bepaalde acceptatie afhankelijk van de buitentemperatuur $T_{e,ref}$. data bron Adaptieve temperatuurgrenswaarden (ATG), ISO 74 (Beek, 2006).

<i>Alpha</i>	Gemiddelde temperatuur [°C] Buitenklimaat	Gemiddelde temperatuur [°C] Binnenklimaat	Gemiddelde relatieve vochtigheid [%] Binnenklimaat
Jan	3,1	21,8	51,5
Feb	3,2	21,9	51
Mrt	6,0	22,2	49
Apr	9,4	22,6	47
Mei	12,9	23	42
Jun	16,4	23,7	35
Jul	18,0	24,1	34
Aug	17,7	24,0	34,5
Sep	14,9	23,4	38
Okt	10,9	22,7	45
Nov	7,2	22,3	48
Dec	4,3	22	51

Tabel 6: gemiddelden binnentemperaturen en relatieve luchtvochtigheden in alpha gebouw m.b.v. model adaptieve temperatuurgrenswaarden voor een bepaalde acceptatie afhankelijk van de buitentemperatuur $T_{e,ref}$. (Beek, 2006) & model relatie luchttemperatuur en luchtvochtigheid, (de Rotte, 1992).

<i>Bèta</i>	Gemiddelde temperatuur [°C] Buitenklimaat	Gemiddelde temperatuur [°C] Binnenklimaat	Gemiddelde relatieve vochtigheid [%] Binnenklimaat
Jan	3,1	21,8	51,5
Feb	3,2	21,9	51
Mrt	6,0	22,2	49
Apr	9,4	22,6	47
Mei	12,9	22,9	42,5
Jun	16,4	23,3	37,5
Jul	18,0	23,5	38,5
Aug	17,7	23,4	38
Sep	14,9	23,2	40
Okt	10,9	22,7	45
Nov	7,2	22,3	48
Dec	4,3	22	51

Tabel 7: gemiddelden binnentemperaturen en relatieve luchtvochtigheden in bèta gebouw m.b.v. model adaptieve temperatuurgrenswaarden voor een bepaalde acceptatie afhankelijk van de buitentemperatuur $T_{e,ref}$. (Beek, 2006) & model relatie luchttemperatuur en luchtvochtigheid, (de Rotte, 1992).

3.5. De invloed van dag en nacht

De temperaturen buiten als binnen kunnen per dag en nacht verschillen en dit heeft invloed op het damptransport (Dettling, 2017). Volgens dhr. Dettling dient dit verwerkt te worden in de simulaties, echter is het verder onbekend tot in hoeverre deze temperatuurschommeling invloed heeft op de duur van deze perioden. Indien de duur van de simulatie een jaar bedraagt, dan hebben de dag- en nachtschommelingen de invloed die het in de praktijk ook zouden hebben. Indien de test op kortere periode wordt uitgevoerd, kan het zijn dat de duur van dag en nacht zodanig minimaal zijn dat het geen invloed heeft in de test. De invloed van dag- en nachtschommelingen in de simulaties zijn in dit onderzoek afhankelijk van de totale duur van de test.

Voorbeeld

Een test op jaarbasis voldoet aan de cyclus van alle vier seizoenen. Deze 365 dagen worden in een verkorte testperiode vertaald naar 365 uur, waarbij elk uur een dag moet voorstellen. Als de dag en nacht meegenomen worden, betekent dit dat een dag alsmede een nacht, 30 minuten duurt. Het is onbekend hoeveel invloed deze temperatuurschommelingen van 30 minuten hebben binnen de test.

4. Klimaatsimulatie

In [hoofdstuk 2](#) en [hoofdstuk 3](#) is onderzocht wat van belang is bij dampdiffusie open bouwen en welke klimaatwaarden daarbij horen. Deze gegevens zijn samengevat tot een simulatieprogramma voor de temperatuur en relatieve vochtigheid binnen de testopstelling. Er dienen twee simulatieprogramma's geschreven te worden. Eén voor het externe klimaat en één voor het binnenklimaat. De verschillen tussen deze twee zorgen voor het damptransport binnen de testopstelling, waar naderhand gemeten en bepaald kan worden of de desbetreffende gevel als dampdiffusie open gedefinieerd kan worden.

Bij dampdiffusie open bouwen dient er geen vochtophoping op te treden bij een volledige cyclus, dat 1 jaar inhoudt. In een periode van 1 jaar speelt zich één cyclus af met betrekking tot de temperatuur, dampspanning en relatieve luchtvochtigheid. Indien een gevelconstructie binnen deze cyclus damp kan opnemen en deze voldoende kan afstaan zodat er geen vochtophoping zich voordoet, kan de gevelconstructie worden gedefinieerd als dampopen.

4.1. Nulpunt bepalen

De nadruk van het principe bij dampdiffusie open bouwen ligt bij het vochtregulerend vermogen. Daarbij heeft de gevelconstructie de capaciteit om vocht op te nemen en af te geven in een gunstige periode. Het damptransport dat hierbij optreedt is een gevolg van een verschil in dampspanning tussen het binnen- en buitenklimaat. Het damptransport gebeurt constant, indien er een verschil in dampspanning aanwezig is. Dit betekent dat de verschillende dampspanningen altijd op zoek zijn naar een evenwicht/acclimatisatie (Stybenex), (Engel, 2017).

Voordat de gevel in de testopstelling geplaatst wordt bevat deze een bepaalde vochtigheid naar aanleiding van het klimaat waarin het zich heeft bevonden. Deze vochtigheid kan sterk verschillen met de vochtigheid die het zou moeten hebben volgens de simulatie. Deze verschillen kunnen een verkeerd beeld geven van de werkelijke situatie. Om deze verschillen uit te sluiten dient er eerst gezocht te worden naar een nulpunt.

Volgens J. van den Engel (2017) dient dit nulpunt te worden gecreëerd door middel van een 'voor-simulatie'. In deze voorsimulatie wordt een klimaat gesimuleerd waarbij de vochtigheid in het testmonster een evenwicht kan zoeken. Zodra dit evenwicht bereikt is, kan de test van start gaan.

NEN-EN-ISO 12572, §6.4 geeft aan monsters op voorhand op te slaan in een temperatuur van $23 \pm 5^\circ\text{C}$ en $50 \pm 5\%$ relatieve vochtigheid voor een periode lang genoeg om het gewicht te stabiliseren, totdat het gewicht succesvol bepaald is binnen de $\pm 5\%$ afwijking. Tevens wordt in de NEN-EN-ISO 12572 aangegeven dat een opslagtijd van 6 uur nodig is. De waarden van 23°C en 50% zijn echter niet van toepassing, omdat er bij dampdiffusie open bouwen sprake is van een dynamisch klimaat.

De test simuleert een periode op jaarbasis waarbij er een startpunt bepaald dient te worden. Dit startpunt heeft geen vereiste. In elk moment van het jaar kan begonnen worden, omdat een test een volledige jaarcyclus dient te draaien. Tijdens de voor-simulatie dienen de vochtsensoren in de gevel in de gaten gehouden te worden. Zodra de vochtigheid in de gevel constant is bij een constante binnen- en buitenklimaat, betekent dit dat het een evenwicht bereikt heeft. Hierna kan de verdere simulatie van start gaan waarbij het binnen- en buitenklimaat veranderd kunnen worden naar aanleiding van het gewenste simulatie programma. Omdat de test een dynamisch is kan er geen temperatuur en relatieve vochtigheid bepaald worden voor de voor-simulatie. Dit kan wel indien het startpunt van de simulatie bepaald is.

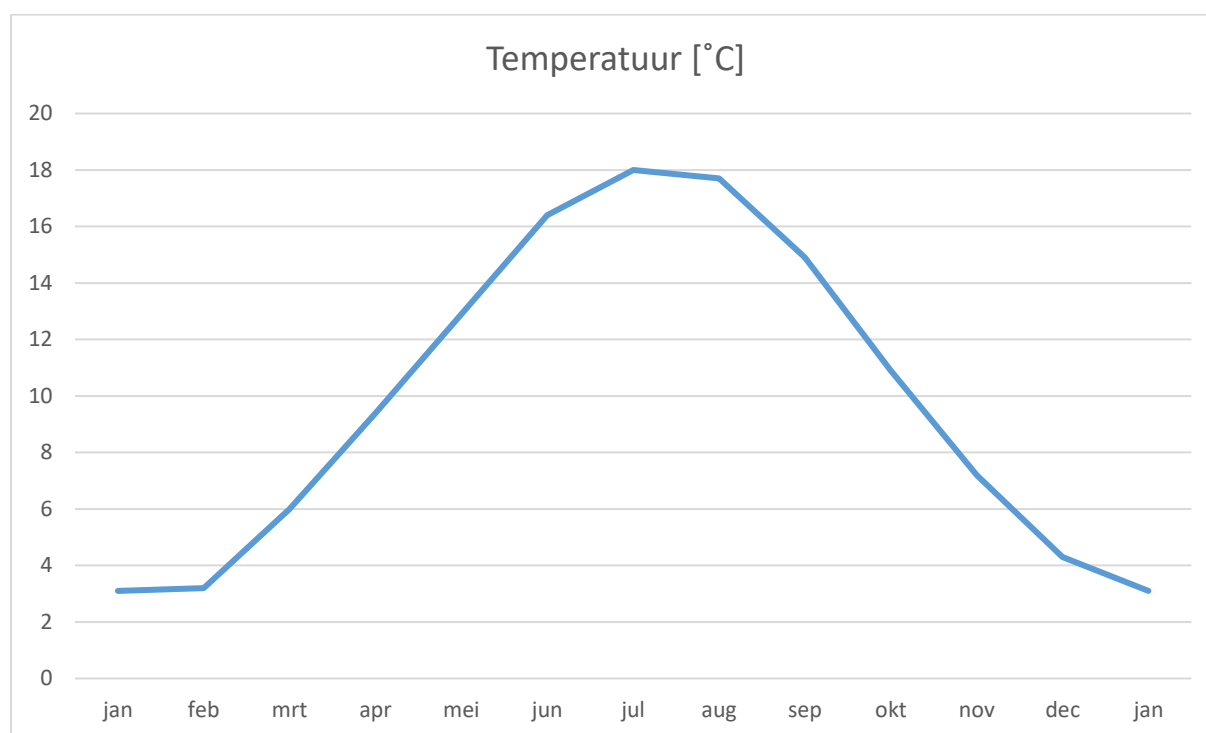
4.2. Externe simulatie

Voor de juiste externe simulatie zijn in hoofdstuk 3 de gegevens van het KNMI geraadpleegd om een gemiddelde temperatuur per maand te bepalen. Een juiste test periode zou één jaar bedragen. Daarbij kun je elke dag en nacht van elk seizoen in het jaar simuleren. Indien het gewenst is om testen over kortere periode uit te voeren dient alsnog het verloop op jaarbasis gesimuleerd te worden. Hierbij wordt de testperiode gedeeld door 12 (het aantal maanden binnen 1 jaar).

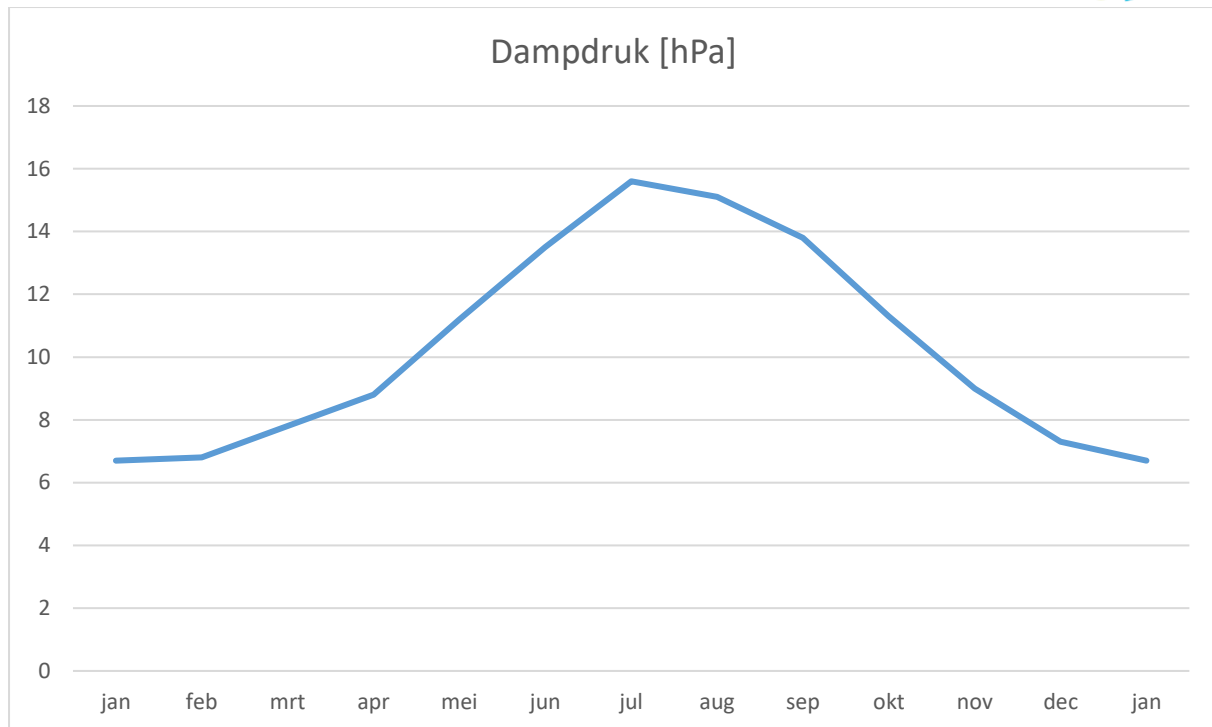
Zoals in [hoofdstuk 3](#) is aangegeven is het van belang voor de simulatie om het klimaat van het desbetreffende gebied in beeld te hebben. Deze informatie wordt in Nederland vaak geleverd door weerstations en is publiekelijk in te zien. Elke simulatie kan daarbij apart voorgeschreven worden om gevels te kunnen testen voor specifieke gebieden. Om een beeld te krijgen van hoe de simulatie opgebouwd dient te worden, is Nederland als voorbeeld genomen binnen dit onderzoek. Tabel 8 geeft de maandgemiddelden weer, afkomstig uit de klimaatatlas 1981-2010 en jaaroverzichten 2009-2016 van het KNMI (zie Figuur 10, Figuur 11 & Figuur 12).

	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Temperatuur [°C]	3,1	3,2	6,0	9,4	12,9	16,4	18,0	17,7	14,9	10,9	7,2	4,3
Dampdruk [hPa]	6,7	6,8	7,8	8,8	11,2	13,5	15,6	15,1	13,8	11,3	9,0	7,3
Relatieve vochtigheid [%]	88	85	83	77	76	78	78	79	84	86	89	90

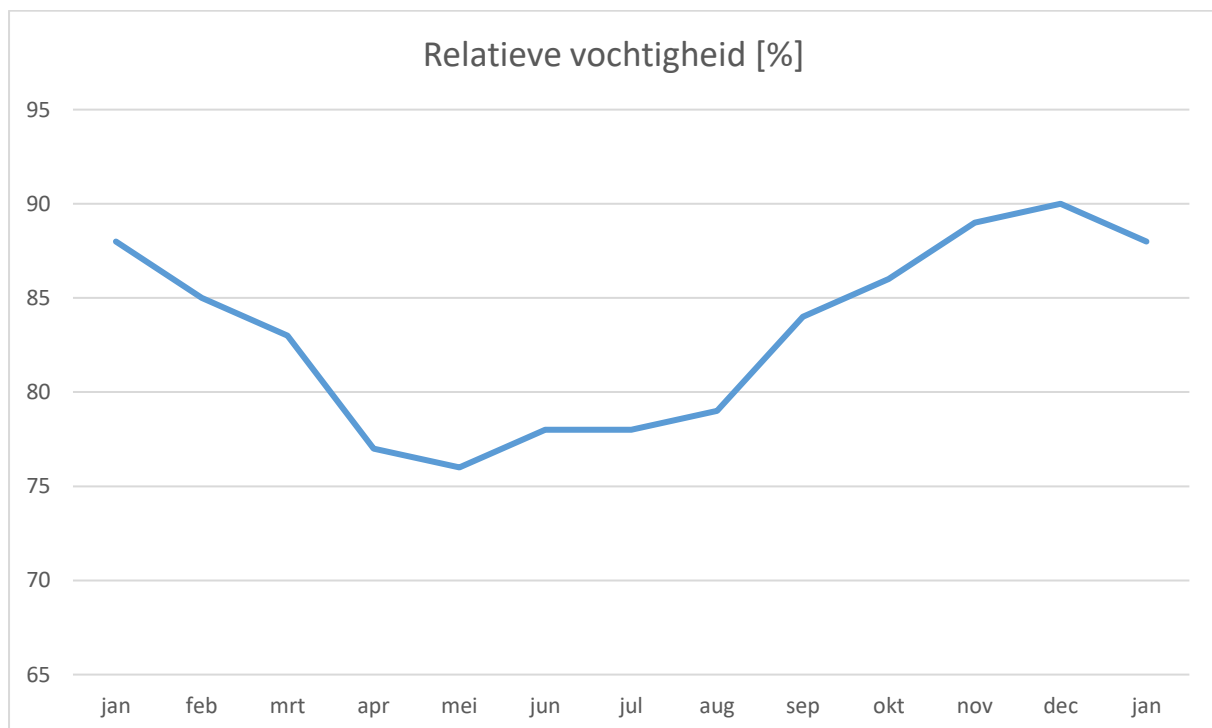
Tabel 8: externe simulatie m.b.v. maandgemiddelden in Nederland, bron data; KNMI



Figuur 10: maandgemiddelde temperatuur in Nederland



Figuur 11: maandgemiddelde dampdruk in Nederland



Figuur 12: maandgemiddelde relatieve vochtigheid in Nederland

4.3. Interne simulatie

Paragraaf 3.4. beschrijft hoe de temperatuur en relatieve vochtigheid voor het binnenklimaat bepaald kunnen worden. Tabel 9 en Tabel 10 geven de resultaten weer van gemiddelde temperaturen en relatieve vochtigheden dat met behulp van het model 'adaptieve temperatuurgrenswaarden' (Beek, 2006) en het model 'relatie luchttemperatuur en luchtvochtigheid' (de Rotte, 1992) is bepaald. De resultaten zijn in Tabel 9 & Tabel 10 zijn vertaald naar grafieken weergegeven in Figuur 13 en Figuur 14. In deze grafieken is opmerkelijk dat de relatieve vochtigheid daalt indien de temperatuur hoger wordt. Dit heeft betrekking op de behaaglijkheid en moet niet verward worden met het feit dat warmere lucht een relatief hogere vochtigheid kan bevatten dan koudere lucht (zie deelonderzoek; thermohygrische eigenschappen). De vochtigheden in Tabel 9 en Tabel 10 zijn een gemiddeld resultaat berekend met behulp van het model uit Figuur 7. Het is mogelijk om een ander percentage relatieve vochtigheid te simuleren indien gewenst of vereist. Dit kan van toepassing zijn indien er een specifieke locatie bekend is.

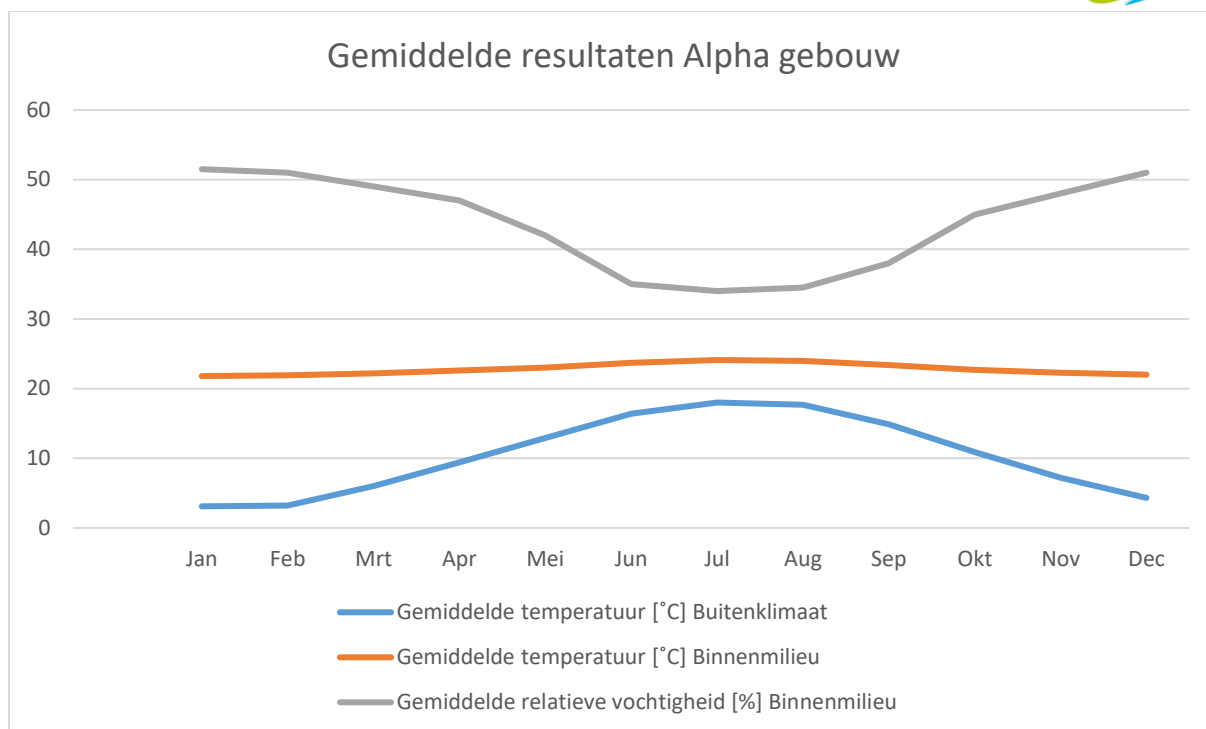
Opmerkelijk is dat het model adaptieve temperatuurgrenswaarden voor alpha gebouwen gelijk is aan bèta gebouwen bij een buitentemperatuur van minder dan ca. 12 °C. Dit resulteert erin dat de temperaturen en relatieve vochtigheden voor een behaaglijk binnenklimaat verschillen in de maanden mei tot en met september, waarbij de buitentemperatuur hoger oploopt dan 12 °C.

Alpha	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Temperatuur [°C]	21,8	21,9	22,2	22,6	23,0	23,7	24,1	24,0	23,4	22,7	22,3	22,0
Relatieve vochtigheid [%]	51,5	51,0	49,0	47,0	42,0	35,0	34,0	34,5	38,0	45,0	48,0	51,0

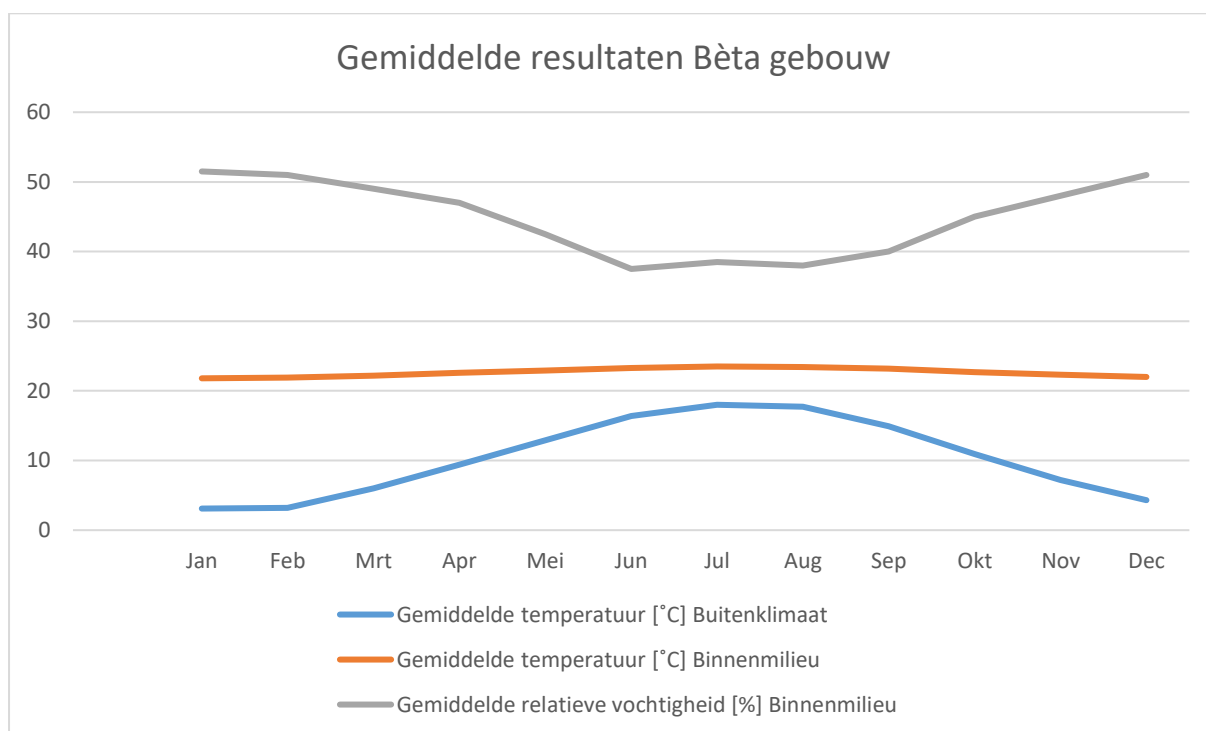
Tabel 9: gemiddelde binnentemperaturen en relatieve luchtvochtigheden in alpha gebouw, afgeleid uit Tabel 6.

Bèta	jan	feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
Temperatuur [°C]	21,8	21,9	22,2	22,6	22,9	23,3	23,5	23,4	23,2	22,7	22,3	22,0
Relatieve vochtigheid [%]	51,5	51,0	49,0	47,0	42,5	37,5	38,5	38,0	40,0	45,0	48,0	51,0

Tabel 10: gemiddelde binnentemperaturen en relatieve luchtvochtigheden in bèta gebouw, afgeleid uit Tabel 7.



Figuur 13: gemiddelden binnentemperaturen en relatieve luchtvochtigheden in alpha gebouw m.b.v. model adaptieve temperatuurgrenswaarden voor een bepaalde acceptatie afhankelijk van de buitentemperatuur $T_{e,ref}$. (Beek, 2006) & model relatie luchttemperatuur en luchtvochtigheid, (de Rotte, 1992).



Figuur 14: gemiddelden binnentemperaturen en relatieve luchtvochtigheden in bèta gebouw m.b.v. model adaptieve temperatuurgrenswaarden voor een bepaalde acceptatie afhankelijk van de buitentemperatuur $T_{e,ref}$. (Beek, 2006) & model relatie luchttemperatuur en luchtvochtigheid, (de Rotte, 1992).

4.4. Extreme klimaat simulatie

Buiten het jaargemiddelde is er altijd een kans aanwezig dat een extreem klimaat zich voordoet. Om garantie te kunnen bieden of de gevelconstructie voldoende kwaliteit biedt binnen deze omstandigheden dient dit ook gesimuleerd te worden. Extremen klimaten binnen Nederland vallen in dit onderzoek onder hitte- en koudegolven, die beide een werking hebben op het damptransport. In Nederland is het over het algemeen binnen warmer dan buiten. Dit zorgt voor een damptransportrichting naar buiten. Tijdens hittegolven kan het zo zijn dat de temperatuur buiten hoger is dan binnen waarbij de damptransportrichting naar binnen is.

"Het KNMI definieert een koudegolf als een aaneengesloten periode in De Bilt van minstens vijf ijsdagen (maximumtemperatuur lager dan 0,0 graden). Hiervan is op minstens drie dagen de minimumtemperatuur lager dan min 10,0 graden (strengte vorst)." - (Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut).

"In Nederland is officieel sprake van een hittegolf als de maximumtemperatuur bij het KNMI in De Bilt gedurende tenminste vijf dagen elke dag 25 graden of hoger is (zomerse dagen). Bovendien moet het in die vijf dagen op zeker drie dagen minstens 30 graden zijn (tropische dagen)." - (Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut).

In Nederland zijn er tot nu toe 24 hittegolven geweest. Het KNMI geeft alleen een overzicht van hittegolven, maar geen van koudegolven. Het bepalen van de duur en temperatuur van een koudegolf wordt gedaan middels de definitie voor koudegolven door het KNMI en een vergelijking met de duur van hittegolven. Het gemiddeld aantal dagen dat een hittegolf duurt in Nederland is 10 dagen (9,125) met een gemiddelde hoogste temperatuur van 32,9°C. Deze gemiddelden zijn berekend met behulp van het overzicht van hittegolven van het KNMI (zie Figuur 16). De definitie die het KNMI geeft voor hitte- en koudegolven, bepalen de volgende waarden voor de simulatie.

Hittegolf = 2 dagen minimum temperatuur van 25 graden
3 dagen minimum temperatuur van 30 graden

Koudegolf = 2 dagen maximum temperatuur van 0 graden
3 dagen maximum temperatuur van -10 graden

Er zijn drie gevallen weergegeven van koudegolven die plaats hebben gevonden in 1929, 1942 en 1956. Alle drie de koudegolven hadden een periode van 9 dagen. De klimaatatlas toont ook aan dat er gemiddeld in Nederland 8-10 ijsdagen zijn in de periode 1981 tot en met 2010 (zie Figuur 17). In De Bilt telt het KNMI, de in Figuur 15 weergegeven aantal ijsdagen tussen 1981 en 2010. Strengte winters gemeten in De Bilt zijn: 1947 (46 ijsdagen), 1963 (42 ijsdagen), 1940 (41 dagen). Recente winters met veel ijsdagen in De Bilt zijn: 1996 (26 ijsdagen), 1997 (22 ijsdagen) & 2010 (20 ijsdagen).

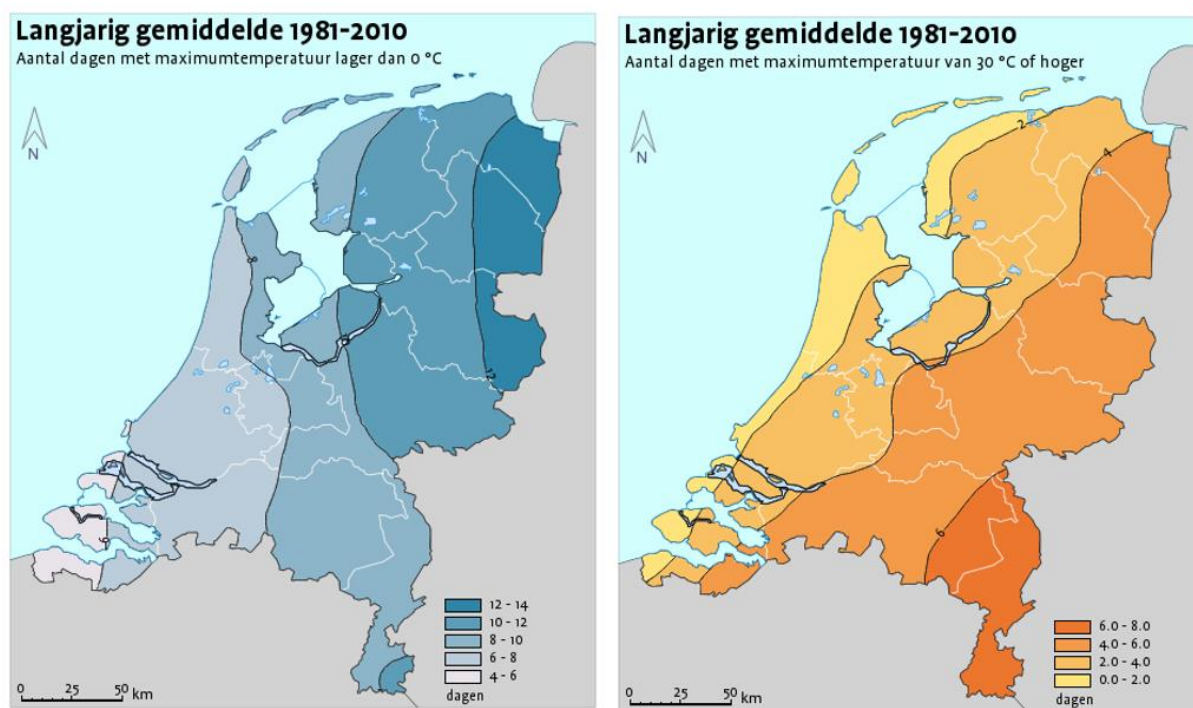
Aantal ijsdagen	
December	2
Januari	3
Februari	2

Figuur 15: klimaatatlas normalen ijsdagen in De Bilt

Deze Lange ijsdagen-perioden komen niet vaak voor. In verband met de garantie die er gegeven dient te worden na het testen en naar aanleiding van de gegevens van het KNMI is het realistisch om te concluderen dat 10 dagen testen bij een temperatuur van -10°C voldoende is voor het testen van een extreme winterperiode in Nederland. Voor het testen van een extreme zomerperiode kan geconcludeerd worden dat 10 dagen met een temperatuur van 30°C voldoende is.

Van	tot en met	Duur in dagen	Aantal tropische dagen	Hoogste temperatuur °C	Datum hoogste temperatuur
08 aug 1911	14 aug 1911	7	5	33.0	10 aug 1911
21 mei 1922	25 mei 1922	5	3	32.8	24 mei 1922
05 jul 1923	14 jul 1923	10	5	33.1	11 jul 1923
20 jun 1941	26 jun 1941	7	3	32.0	23 jun 1941
06 jul 1941	13 jul 1941	8	6	32.2	12 jul 1941
14 aug 1947	21 aug 1947	8	3	32.2	16 aug 1947
26 jul 1948	30 jul 1948	5	4	31.3	28 jul 1948
29 jul 1975	15 aug 1975	18	6	32.9	08 aug 1975
23 jun 1976	09 jul 1976	17	10	34.9	03 jul 1976
29 jul 1982	04 aug 1982	7	4	31.9	02 aug 1982
04 jul 1983	12 jul 1983	9	3	33.0	11 jul 1983
26 jul 1990	04 aug 1990	10	3	35.3	04 aug 1990
19 jul 1994	31 jul 1994	13	5	34.1	24 jul 1994
29 jul 1995	03 aug 1995	6	3	32.3	31 jul 1995
05 aug 1997	13 aug 1997	9	5	32.1	13 aug 1997
28 jul 1999	04 aug 1999	8	3	31.4	01 aug 1999
22 aug 2001	26 aug 2001	5	3	31.1	25 aug 2001
31 jul 2003	13 aug 2003	14	7	35.0	07 aug 2003
02 aug 2004	11 aug 2004	10	3	32.5	09 aug 2004
18 jun 2005	24 jun 2005	7	3	32.8	20 jun 2005
30 jun 2006	06 jul 2006	7	3	32.0	04 jul 2006
15 jul 2006	30 jul 2006	16	8	35.7	19 jul 2006
21 jul 2013	27 jul 2013	7	3	32.6	22 jul 2013
30 jun 2015	05 jul 2015	6	3	33.1	01 jul 2015
Totaal 24 hittegolven					

Figuur 16: hittegolven in Nederland, data bron KNMI



Figuur 17: klimaatatlas; ijsdagen & tropische dagen kaart, data bron KNMI

3. Conclusie

Als gevolg uit dit deelonderzoek kan geconcludeerd worden wat van belang is bij dampdiffusie open bouwen en hoe dit vertaald kan worden naar een programma van randvoorwaarden voor de testopstelling. Parallel aan dit onderzoek is een schetsconcept bedacht over hoe de testopstelling vorm zou krijgen. Dit is in deelonderzoek; ontwerp testopstelling uitgewerkt en hierin wordt tevens het verloop van het ontwerp proces nader omschreven. Naar aanleiding van dit onderzoek

Randvoorwaarden voor dampdiffusie open gevelconstructies:

- Constructies dienen hoge prestatie op luchtdichtheid te hebben.
- Constructies dienen een isolerende werking te hebben.
- Constructies dienen aan de buitenzijde winddicht te zijn om drukverschillen te voorkomen in de constructie (kierdichting is cruciaal).
- De dampdiffusieweerstand aan de binnenzijde dient hoger te zijn dan aan de buitenzijde. Hierbij is de damptransportrichting naar buiten gericht.
- In de constructie mag geen ophoping van vocht aanwezig zijn.
 - Kierdichting is cruciaal bij dampopen bouwen.
 - Isolatielaag dient bestendig te zijn tegen vocht en heeft een vochtregulerend vermogen (vochtbuffer). Hierbij is het belangrijk dat de Rc-waarde van het isolatie materiaal 'niet' vermindert.
- Dampremmende folies niet toepassen.
- De gevelopbouw is zodanig ontworpen dat er geen inwendige condensatie kan plaatsvinden. Indien dit zich wel voordoet dient de gevel in staat te zijn dit binnen een jaar af te voeren, waardoor er op jaarbasis geen vochtophoping ontstaat.
- De materiaallagen aan de buitenzijde (spouwzijde) van de wand dienen voldoende dampdoorlatend te zijn.
- Isolatie materiaal dient een vochtregulerend vermogen te hebben, waarbij het belangrijk is dat deze vocht kan opnemen en afgeven. Biobased materialen bevatten deze eigenschap vaak.
- Koudebruggen dienen voorkomen te worden.
- Binnenzijde dient niet 'dichtgesmeerd' te worden met een dampdiffusie dichte laag.

Randvoorwaarden testopstelling:

- Dampdiffusie is het transport van damp (vocht) door een materiaal heen als gevolg van verschil in dampspanning. In bouwwerken gebeurt dit omdat er een verschil is in temperatuur binnen ten opzichte van buiten, wat zorgt voor een dampspanningsverschil.
- Dampdiffusie open gevels dienen getest te worden op jaarbasis, waarbij de seizoenen een cruciale rol spelen en de dampdiffusie afhankelijk is van temperatuur, dampspanning en relatieve luchtvochtigheid. Hier gaat deelonderzoek; thermohygrische eigenschappen dieper op in en geeft inzicht in deze aspecten. Het gevolg is dat deze aspecten gemonitord en aangestuurd dienen te worden in de testopstelling om constant het juiste klimaat te simuleren.
- Het damptransport is afhankelijk van het verschil tussen het binnen- & buitenklimaat, waarbij het klimaat in de testopstelling aan beide zijden gecontroleerd dient te worden. Deze controle kan worden uitgevoerd met behulp van de klimaatkamers en deze klimaatkamers dienen aan de volgende eisen te voldoen.
 - De klimaatkamers dienen gekoppeld te zijn, waartussen het testmonster (gevel) geplaatst kan worden.
 - De klimaatkamers dienen thermisch geïsoleerd te worden indien de apparatuur niet voldoende capaciteit biedt om de temperatuur constant te houden. Geïsoleerde

klimaatkamers kunnen leiden tot minder zware apparatuur, aangezien de temperatuur meer behouden wordt. Tevens zorgt dit voor minder kosten voor het gebruik van de apparatuur.

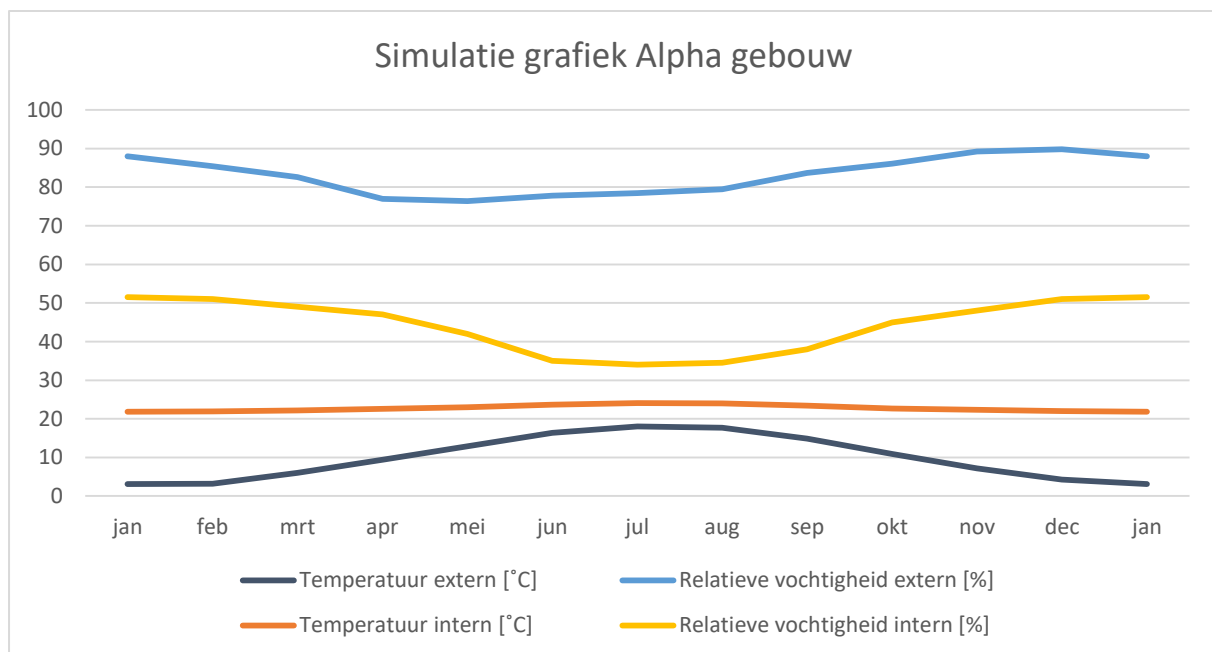
- De klimaatkamers dienen luchtdicht te zijn om te voorkomen dat damp uit de klimaatkamers ontsnapt. Kierdichting is hierbij cruciaal. Dampdicht bouwen is vereist indien de apparatuur niet voldoende capaciteit biedt om de relatieve luchtvochtigheid constant te houden. Dampdichte klimaatkamers kunnen leiden tot minder zware apparatuur, aangezien de vochtigheid meer behouden wordt. Dampdiffusiedicht is uitsluitend te realiseren met materialen zonder poriën zoals onder andere; glas, schuimglas, metalen, graniet, basalt, hardsteen en marmer (Architecten Gilde), (Bouwcentrum advies).
- De capaciteit van de klimaatkamers met betrekking tot het verhogen en verlagen van de temperatuur, dampspanning en relatieve vochtigheid dient een zodanig bereik te hebben dat het internationaal alle klimaten kan simuleren. Hiermee kan de efficiëntie en continuïteit van de testopstelling verhoogd worden. In de meest extreme gevallen bedraagt dit temperaturen van ca. -74,5°C en 56,7°C. Echter dient er nader gekeken te worden in welke gebieden er getest wenst te worden. Daarna kunnen de bijhorende waarden worden bepaald en daarop kan de capaciteit op aangepast worden.
- In overleg met de opdrachtgever is besloten om de capaciteit voor de klimaat simulatie te focussen op klimaat in Nederland, met uiterste temperaturen van -15°C en 40°C.
- Relatieve vochtigheden in Nederland lopen gemiddeld van 75% tot 90%. In verband met de continuïteit is het aanbevolen om apparatuur toe te passen met een bredere capaciteit die in staat zijn waarden te simuleren van 10% tot 95%.

Randvoorwaarden simulatie:

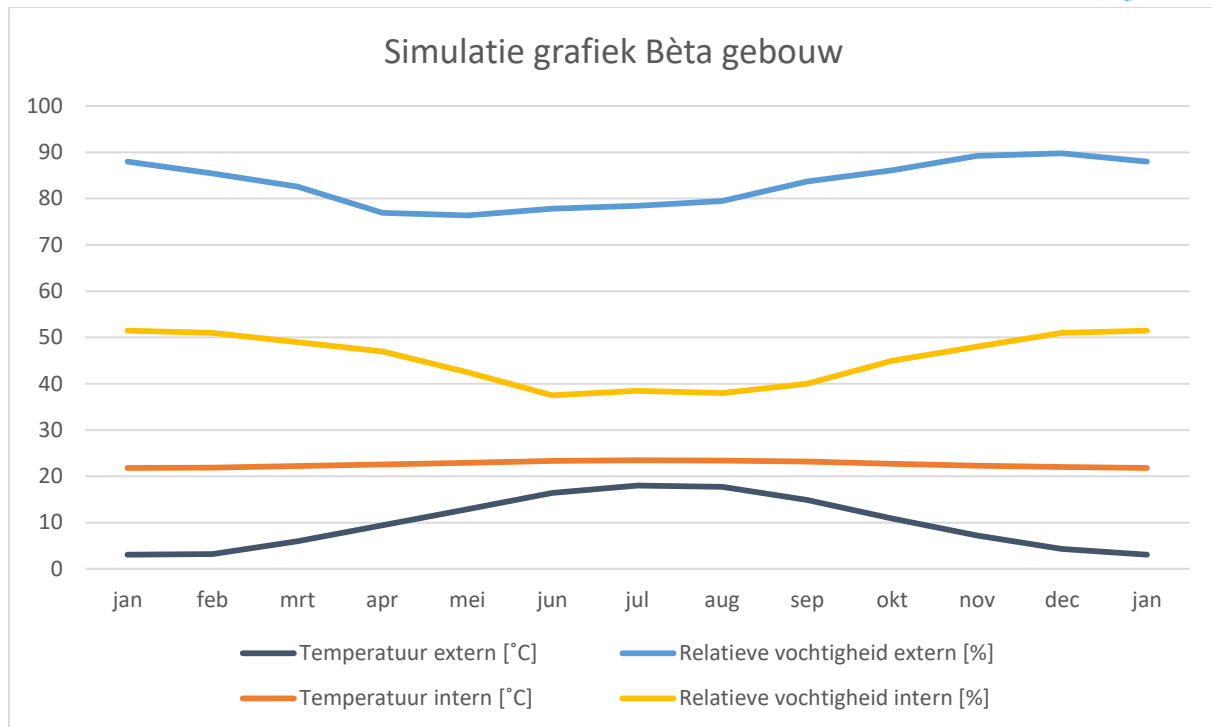
- De keuze voor het gebruiken van maandelijkse klimaatdata is bepaald door methoden uit NEN-EN-ISO normen, waaronder ISO 13788: 2013 en NEN-EN-ISO 15927-1 (Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut, 2013). Het rapport door S. Uittenbosch (2012), die beschrijft dat er buitenom de normen ook de mogelijkheid is de data vanuit het KNMI te nemen. Om een specifiek en juist beeld te krijgen zijn de data van het KNMI nader bestudeerd om een gemiddeld landelijk maandgemiddelde te bepalen.
- Dient op jaarbasis gesimuleerd te worden waarbij er wordt uitgegaan van maandgemiddelde temperaturen en relatieve vochtigheden. Deze maandgemiddelden zijn afkomstig uit het KNMI en komen voort uit het klimaat in Nederland. Indien een specifiek klimaat per locatie gesimuleerd moet worden, dient er gekeken te worden naar het klimaat dat op die locatie van toepassing is. Hetzelfde geldt indien er simulaties uitgevoerd dienen te worden op internationaal gebied.
- Simulatie voor binnenklimaat is afhankelijk van de functie en wensen binnen een gebouw. In dit deelonderzoek is een manier beschreven naar aanleiding van het onderzoek adaptieve temperatuurgrenswaarden (ATG) door Marco van Beek (2006), wat uitgaat van kantoorgebouwen. Het doel van deze aanpak is om een voorbeeld te tonen. Het binnenklimaat van kantoorgebouwen kan echter verschillen met woningen of andere specifieke functies binnen bouwwerken. Daarom dient bij een simulatie altijd gekeken te worden naar de functie van het gebouw, eisen en wensen van de gebruiker en het verloop van het binnenklimaat.
- De lengte van de simulatie is onbepaald. De ideale lengte van de test is een jaar, waarbij alle seizoenen, dagen en nachten gesimuleerd kunnen worden. Hierbij zal de testopstelling een jaar lang constant gebruikt worden. Er is eventueel een mogelijkheid deze test in een kortere periode uit te voeren indien dit gunstig is en de resultaten betrouwbaar zijn. Naar de exacte lengte zal gezocht moeten worden met de gerealiseerde testopstelling. De transportsnelheid van vocht binnen een dampdiffusie open gevelconstructie is verschillend en niet bekend. Het principe van de

testopstelling is dat er geen vochtophoping mag ontstaan na het uitvoeren van de simulatiecyclus, ongeacht de lengte van de test.

- Voordat de test uitgevoerd kan worden dient er een 'voor-simulatie' gedaan te worden, waarbij het beginpunt van de test voor een periode wordt aangehouden totdat de vochtigheid in de gevel een evenwicht gevonden heeft.
- Wind en zonlicht zijn uitgesloten binnen dit onderzoek omdat dit de testopstelling erg complex maakt. Wind en zonlicht hebben een positieve werking op het afvoeren van damp aan de buitenzijde van de gevel. Indien de gevel voldoet aan de eisen voor dampdiffusie open bouwen zonder deze aspecten, zal deze in theorie ook voldoen inclusief wind en zonlicht. Tevens is er de mogelijkheid om deze aspecten achteraf in de testopstelling toe te passen.
- Figuur 18 en Figuur 19 geven simulatie programma's weer die in de testopstelling uitgevoerd kunnen worden. In deze programma's worden uitsluitend de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid behandeld en welke waarde deze dienen te hebben per periode. Er dient hierbij rekening gehouden te worden met het feit dat de werkelijke totale lengte van de simulatie onbepaald is en deze later bepaald dient te worden. Het is van belang dat de totale lengte, naar aanleiding van de simulatie in Figuur 18 en Figuur 19, gedeeld dient te worden door 12 (aantal maanden in een jaar).
- Buitenom de test die het jaargemiddelde simuleert dienen er testen gedaan te worden met betrekking tot extreme weersomstandigheden. Hierbij kan zowel een hitte- als koudegolf worden gesimuleerd. Daarbij dient 10 dagen per periode getest te worden met een buitentemperatuur van 30°C voor de hittegolf en -10°C voor de koudegolf.
- Dag- en nachtperioden kunnen meegenomen in de simulatie, echter is het onbekend wat deze temperatuur schommelingen doen binnen een verkorte simulatieduur. Dit dient nader onderzocht te worden tijdens het uitvoeren van de testen.



Figuur 18: simulatie programma voor alpha gebouwen binnen Nederland.



Figuur 19: simulatie programma voor bèta gebouwen binnen Nederland.

4. Literatuurlijst

- Arbovakbase. (2015, April 24). *Richtlijnen algemene thermische behaaglijkheid*. Opgehaald van Arbovakbase: <http://www.arbovakbase.nl/artikel/richtlijnen-algemene-thermische-behaaglijkheid-11238.html>
- Architecten Gilde. (sd). *Bouwfysica tabellarium overzicht materiaaleigenschappen*. Opgehaald van Architecten Gilde: http://www.architectengilde.nl/wp-content/uploads/2013/09/Bouwfysica_tabellarium_overzicht_materiaaleigenschappen.pdf
- Beek, M. v. (2006). *Adaptieve Temperatuurgrenswaarden Adaptieve Temperatuurgrenswaarden*. Den Haag: TU Delft.
- Bos, R. (2014, Juni 10). *Dampopen isoleren*. Opgehaald van Club green: <https://www.clubgreen.nl/dampopen-isoleren/>
- Bouwcentrum advies. (sd). *Bouwfysica tabellarium*. Opgehaald van Joost de Vree: http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgb/bouwfysisch_tabellarium_www_bouwcentrum-advies_nl.pdf
- Buishand, T., & Velds, C. (sd). *Klimaat van Nederland 1. Neerslag en verdamping*. Nederland: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- College van Deskundigen "Isolatiematerialen en Dakbedekkingen". (2013). *Nationale beoordelingsrichtlijn 4708*. CULEMBORG: SGS INTRON Certificatie B.V.
- de Rotte, D. J. (1992). *Behaaglijkheidstheorie*. 's Hertogenbosch: Hogeschool 's Hertogenbosch.
- Dettling, D. (2017, Maart 23). Dampdiffusie open bouwen. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Engel, J. v. (2017, Maart 23). Bouwfysica. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Groenhart houtskeletbouw. (2015). *Groenhart houtskeletbouw*. Opgehaald van damp-open bouwen: <http://www.groenhart-houtskeletbouw.nl/damp-open-bouwen>
- Hasselaar, E. (2015, Mei 25). *Vochtbalans woning*. Delft, Zuid Holland, Nederland: TU Delft.
- Kennisinstituut voor de installatiesector. (2014). *Thermische behaaglijkheid*. Rotterdam: ISSO.
- Koninklijk Nederland Meteorologisch Instituut. (sd). *Kennis- & datacentrum*. Opgehaald van KNMI: <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/>
- Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. (sd). *Normalen AWS 1981-2010*.
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2013). *NEN-EN-ISO 13788 pdf preview*. Opgehaald van NEN: https://www.nen.nl/pdfpreview/preview_179390.pdf
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2016). *NEN-EN-ISO 12572*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut.
- Kuindersma, P. (2013, December 5). Geïsoleerde houten dakdozen met een dampdichte afwerking,. *Roofs*. Alkmaar, Noord Holland, Nederland: Lindeman Uitgevers.
- Kuindersma, P. (2017, Februari 27). Bouwfysica dampdiffusie open bouwen. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Kurvers, S., van der Linden, K., & H., C. (2012). *Literatuurstudie thermisch comfort*. Delft: Agentschap NL.

- Meerkerk, H., & Vries, J. d. (2016, Januari). Biobased dampopen gevels. Rotterdam, Zuid Holland, Nederland.
- Meteoschoonebeek. (sd). *Weerextremen Nederland*. Opgehaald van Meteoschoonebeek: <http://www.meteoschoonebeek.nl/weerextremennederland>
- Nelson, N. (2001, July). A possible world record. Bracknell, Berkshire, The United Kingdom.
- NEN. (2013, December 13). *De meest comfortabele temperatuur in huis?* Opgehaald van NEN: <https://www.nen.nl/NEN-Shop/Actualiteiten-Gas-Water/De-meest-comfortabele-temperatuur-in-huis.htm>
- Peutz. (sd). *Klimaatkamers*. Opgehaald van Peutz: <http://www.peutz.nl/node/134>
- Prinsen, N. (2015, Juli). Dampopen bouwen doe je zo. Delft, Zuid Holland, Nederland: SBRCURnet.
- Prinsen, N. (2016, juni 20). *Bouwen met biobased materialen*. SBRCURnet. Opgehaald van Bouwen met biobased materialen.
- SKH. (2012). *(Prefab) Houten elementen voor energiezuinig en luchtdicht bouwen*. Wageningen: SKH.
- Spinu, M. (2012). *Vapor permeable or impermeable building envelope materials, does it matter?* DuPont.
- Stjepanova, N. A. (1958, Januari 30). On the lowest temperatures on earth. Washington D.C., The United States.
- Stybenex. (sd). EPS en vocht. Zaltbommel, Nederland.
- Tilmans, A., & De Mets, T. (2017, Februari). *Dampopen wanden*. Opgehaald van WTCB: <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact54&art=824>
- Uittenbosch, S. (2012). *Risico van inwendige condensatie in een externe*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
- VROM. (2006, augustus). Ventileren. Den Haag, Noord Holland, Nederland.
- Wegkamp, I. G. (2016, Maart). *Dampopen bouwen, zin of onzin*. Opgehaald van Dantumawegkamp: <https://dantumawegkamp.nl/kennisbank/dampopen-bouwen-zin-of-onzin>
- Wikipedia. (2016, December 11). *Zeeklimaat*. Opgehaald van Wikipedia: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Zeeklimaat>

Bijlage II



Thermohygrische eigenschappen bij dampdiffusie open bouwen.

Wat er wordt verstaan onder thermohygrische eigenschappen en welke daarvan van toepassing is bij het testen van een dampdiffusie open gevelconstructie?

Deelonderzoek
Versie 3

Inhoud

1.	INLEIDING	1
2.	THERMOHYGRISCHE EIGENSCHAPPEN.....	1
2.1.	TEMPERATUUR.....	2
2.2.	NATTE EN DROGE BOL TEMPERATUUR.....	2
2.3.	DAMPSPANNING (WATER).....	3
2.3.1.	Vergelijking '1'	3
2.3.2.	Vergelijking van Antoine	3
2.3.3.	Vergelijking van Tetens.....	3
2.3.4.	Vergelijking van Buck.....	3
2.4.	ABSOLUTE LUCHTVOCHTIGHEID.....	4
2.5.	RELATIEVE LUCHTVOCHTIGHEID.....	4
2.6.	DAUWPUNT	5
2.7.	INWENDIGE CONDENSATIE	5
2.8.	HET MOLLIERDIAGRAM.....	6
2.9.	DAMPDIFFUSIE(WEERSTAND).....	7
2.10.	DAMPTRANSPORT (WATER).....	8
3.	SOFTWARE OP VOCHTTTRANSPORT	8
4.	CONCLUSIE	10
5.	BRONNENLIJST	12
	BIJLAGEN	14

1. Inleiding

In deelonderzoek 1: dampdiffusie open bouwen wordt omschreven dat er drie bouwfysische aspecten zijn die gecontroleerd dienen te worden om klimaatregeling mogelijk te maken binnen de testopstelling. Deze aspecten zijn: temperatuur, dampspanning en relatieve vochtigheid die tevens van elkaar afhankelijk zijn. In dit deelonderzoek is nader onderzocht wat 'thermohygrisch' inhoud, welke thermohygrische eigenschappen betrekking hebben tot dampdiffusie open bouwen en welke hiervan van toepassing zijn bij de testopstelling.

2. Thermohygrische eigenschappen

De term thermohygrische eigenschappen is een breed overkoepelend begrip. Deze term dient daarom gespecificeerd te worden tot concrete begrippen die betrekking hebben tot dampdiffusie open bouwen. Thermohygrische eigenschappen zijn in het algemeen de bouwfysische eigenschappen van een materiaal met betrekking tot vocht- en warmteoverdracht.

Thermo- = "Ter vorming van woorden die betrekking hebben op heet of warm."
(Internationale woordenboek, 2017).

Hygrisch = gedrag in verband met luchtvochtigheid.
(Daidalos Peutz bouwfysisch ingenieursbureau, 2007).

Eerder is naar voren gekomen dat dampdiffusie open bouwen hoofdzakelijk te maken heeft met vocht en het transporteren hiervan. Hieronder volgt een opsomming van thermohygrische eigenschappen die invloed hebben bij dampdiffusie open bouwen. In verband met internationale bronnen zijn de bouwfysische termen vertaald naar het Engels (zie Tabel 1). Het is van belang dat deze termen nader onderzocht dienen te worden om een duidelijk beeld te krijgen welke invloed zij hebben. Tevens kan daaruit bepaald worden elke thermohygrische eigenschappen daadwerkelijk van toepassing zijn binnen dit onderzoek.

Nederlandse benaming	Engelse vertaling
Temperatuur	Temperature
Absolute luchtvochtigheid	Absolute humidity
Relatieve luchtvochtigheid	Relative humidity
Dauwpunt	Dew point
Inwendige condensatie	Interstitial condensation
Dampdiffusie (weerstand)	Vapor diffusion (resistance)
Dampspanning (-druk)	Vapor pressure
Damptransport (-stroom)	Vapor Permeance / -Permeability
Waterdampdoorlatendheid	Water vapor transmission (rate)

Tabel 1: bouwfysische termen m.b.t. dampdiffusie op bouwen vertaalt naar Engels (Architecten Gilde), (Bouwcentrum advies), (Stybenex).

2.1. Temperatuur

"Warmtegraad van de lucht, van gassen, vloeistoffen, vaste stoffen, van het menselijk lichaam." - (van Dale Uitgevers).

De warmtegraad van temperatuur kan op meerdere wijzen worden genoteerd. Deze wijzen bevatten verschillende eenheden waarin zij aangeduid worden. Per regio wordt vaak één van de verschillende eenheden gebruikt. Het gebruik van verschillende eenheden kan zorgen voor verwarring. Het is daarom belangrijk dat het duidelijk is welke eenheden je waar toepast (Figuur 1). Hieronder worden de verschillende eenheden genoteerd met bijhorende regio's (zie Table 1).

Table 1: Eenheden temperatuur

Eenheid	Verbaal	Regio	Omvorming
°C	Graden Celsius	Worldwide except for countries using Fahrenheit.	$T_C = \frac{5}{9} (T_F - 32)$
°F	Graden Fahrenheit	U.S.A, Bahamas, Belize, Palau, Cayman Islands,	$T_F = \frac{5}{9} (T_C + 32)$
°K	Graden Kelvin	Eenhedenstelsel SI	0 °K = -273,15 °C (absolute nulpunt)



Figuur 1: Temperatuur eenheden per regio

2.2. Natte en droge bol temperatuur

Als het we over lucht spreken, bedoelt men het mengsel tussen droge lucht en waterdamp. Droge bol temperatuur is de temperatuur die men doorgaans kent. Dit is de temperatuur die gemeten worden met een thermometer. De natte bol temperatuur wordt ook gemeten met een thermometer, echter wordt hier een 'kousje' om de voeler geplaatst die constant vochtig wordt gehouden met gedistilleerd of gedemineraliseerd water. Indien er geen sprake is van een verzadigde luchtvochtigheid, zal rondom de voeler water verdampen. Deze verdamping vergt warmte die uit de voeler wordt onttrokken, waardoor de temperatuur daalt (Uges). Een natte bol temperatuur is geschikt voor het meten van een nat oppervlak.

2.3. Dampspanning (water)

De dampspanning is afhankelijk van de temperatuur en vluchtigheid van (vloeistof). De dampspanning van water kan op meerdere manieren worden berekend. Elke vergelijking berekend de dampspanning bij een bepaalde temperatuur. Er zitten kleine verschillen in de uitkomsten van de verschillende vergelijkingen. De verschillende vergelijking toont aan dat het berekenen van de dampspanning niet gemakkelijk is. In de bouwfysica wordt echter vaak de dampspanningstabel gebruikt die de verzadigde dampspanning weergeeft bij bepaalde temperaturen (zie Tabel 4).

2.3.1. Vergelijking '1'

$$P(\text{mmHg}) = \exp\left(20.386 - \frac{5132}{T}\right) \quad (1)$$

P = Dampspanning [mmHg]
T = Temperatuur [°K]

2.3.2. Vergelijking van Antoine

$$\log P = A - \frac{B}{T+C} \quad (2)$$

P = Absolute dampspanning van een stof [Torr]
T = Temperatuur van een stof [°C]
A, B, C = Zijn specifieke coëfficiënten per stof (bijv. constanten of parameters)
Log = Is een typisch logaritme als in log₁₀

2.3.3. Vergelijking van Tetens

$$P = 0.61078 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \quad (3)$$

P = Dampspanning [kPa]
T = Temperatuur [°C]

2.3.4. Vergelijking van Buck

$$P = 0.61121 \exp\left(\left(18.678 - \frac{T}{234.5}\right)\left(\frac{T}{257.14+T}\right)\right) \quad (4)$$

P = Dampspanning [kPa]
T = Temperatuur [°C]

2.4. Absolute luchtvochtigheid

Dit is de hoeveelheid waterdamp die zich in de lucht bevindt en wordt uitgedrukt in g/m³.

"De maximale waarden, die dampconcentratie en dampspanning kunnen bereiken, c_s resp. p_s , zijn als functie van de luchttemperatuur gegeven in de dampspanningstabel." - (Bouwcentrum advies).

Lucht met hogere temperaturen kan meer damp bevatten dan lucht met koudere temperaturen (Hendriks). Dit blijkt ook uit het Mollierdiagram (zie Figuur 4) en dampspanningstabel (zie Tabel 4).

$$p = R_d \times T_k \times c \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$

R_d = gasconcentratie voor waterdamp, 461 [m²/s²K]

T_k = de temperatuur in Kelvin (Celsius + 273,15) [K]

c = dampconcentratie, hier uitdrukken in [kg/m³]

2.5. Relatieve luchtvochtigheid

Geeft aan hoeveel waterdamp zich werkelijk in de lucht bevindt ten opzichte van de maximale hoeveelheid waterdamp die de lucht kan bevatten. De relatieve luchtvochtigheid heeft in een binnenmilieu invloed op de beleving en behaaglijkheid. Deze beleving wordt in Nederland onderscheiden in vier klimaatklassen, waarbij 'klimaatklasse I' als 'droog' gezien wordt en 'klimaatklasse IV' als 'zeer nat' (zie Tabel 2).

$$\Phi = \frac{e_w}{e^*_w} \times 100\% \quad (6)$$

$$RV = \frac{P_v}{P_{max}} \times 100\% \quad (7)$$

RV = Relatieve Luchtvochtigheid

P_v = Dampspanning (aanwezig)

P_{max} = Dampspanning (maximaal)

Tabel 2: binnenklimaatklassen voor Nederland, bron data; (BRL 1309).

Klimaatklasse (BKK)	Gebruik ruimte	Optredende dampdruk [Pa]	Temperatuur en relatieve vochtigheid
I	Opslagloodsen Garages Schuren	1030 < P_1 < 1080	18°C – 50% tot 18°C – 52%
II	Woningen Kantoren Winkels	1080 < P_1 < 1320	20°C – 46% tot 20°C – 56%
III	Scholen Verpleeginrichtingen Bejaardencentra Recreatiegebouwen	1320 < P_1 < 1430	22°C – 50% tot 22°C – 54%
IV	Wasserijen Zwembaden Drukkerijen	P_1 > 1430	24°C – 48% en hoger

2.6. Dauwpunt

Het dauwpunt is de temperatuur waarin de lucht verzadigd is met waterdamp en deze niet kan worden vastgehouden. Dit vocht wordt omgezet naar zijn vloeibare fase (condensatie). Warme lucht kan meer vocht bevatten dan koude lucht. De afkoeling van lucht tot het dauwpunt, met een gelijkblijvende relatieve vochtigheid zorgt voor condensatie van overmatige vocht. Het veranderen van gas fase naar vloeibare fase wordt ook wel condensatie genoemd.

$$T_d = \frac{b \times \gamma(T, RL_v)}{a - \gamma(T, RL_v)} \quad (8)$$

$$\gamma(T, RL_v) = \frac{a \times T}{a + T} + \ln(RL_v \div 100) \quad (9)$$

$$0\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$1\% < RL_v < 100\%$$

$$0\text{ }^{\circ}\text{C} < T_d < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

T	=	Temperatuur in graden Celsius
RL _v	=	Relatieve luchtvochtigheid (%)
T _d	=	Te berekenen dauwpuntstemperatuur
a	=	17,27
b	=	237,7 °C
ln	=	Is de natuurlijke logaritme.

2.7. Inwendige condensatie

Condensatie ontstaat wanneer de werkelijke dampspanning gelijk is aan de maximale toelaatbare dampspanning, dat een gevolg is van de temperatuur. Hierbij is de relatieve luchtvochtigheid ook wel 100%, wat als gevolg heeft dat het overige waterdamp 'condenseert' (van gas- naar vloeibare fase veranderd). Dit gebeurt omdat de lucht verzadigd is en de waterdamp niet meer kan opnemen (Jong, 2013). Inwendige condensatie kan in een stationaire situatie worden berekend door middel van de Glaser methode (NEN-EN-ISO 13788, 2013). Hiermee kan bepaald worden of er condensatie optreedt in de constructie op een specifiek moment met een op dat moment geldende dampspanning, relatieve vochtigheid, isolatiewaarden van constructiedelen en binnen- & buitentemperaturen. Deze methode is geschikt om extreme situaties uit te sluiten, omdat deze een relatief korte periode bezetten. Echter biedt het onvoldoende capaciteit om een dynamische berekening te maken zoals bij dampdiffusie open bouwen vereist is. Tegenwoordig worden computers gebruikt om dynamische modelberekeningen te maken, waarbij niet-stationaire situaties in mee kunnen worden genomen. Bij dampdiffusie open bouwen zijn dit;

- Verandering van de weerstand tegen vochttransport in een bouw materiaal, als gevolg van het vochttransport;
- Verandering van de hoeveelheid gecondenseerd vocht uit dampdiffusietransport als gevolg van uitdroging en herhaalde condensatie;
- Verandering, hoewel tijdelijk, van de isolatiewaarde van een bouw materiaal als gevolg van condensatie.

Inwendige condensatie speelt een rol in deze testopstelling omdat dit mogelijk kan voorkomen. Met dampopen bouwen zou dit opgelost moeten kunnen worden. Het is daarom belangrijk om te weten hoe inwendige condensatie werkt, waar dit gemeten en hoe dit berekend dient te worden.

2.8. Het Mollierdiagram

Het Mollierdiagram kan op meerdere manieren gelezen worden en daarmee kunnen verschillende waarden worden bepaald (zie bijlage; Figuur 4). De volgende gegevens kunnen onder andere van het Mollierdiagram worden afgelezen:

- o De absolute vochtigheid (AV) en de verzadigingsvochtigheid (VV)
- o De relatieve vochtigheid (RV) en het effect van RV-verandering
- o Het vochtdeficit
- o Het dauwpunt

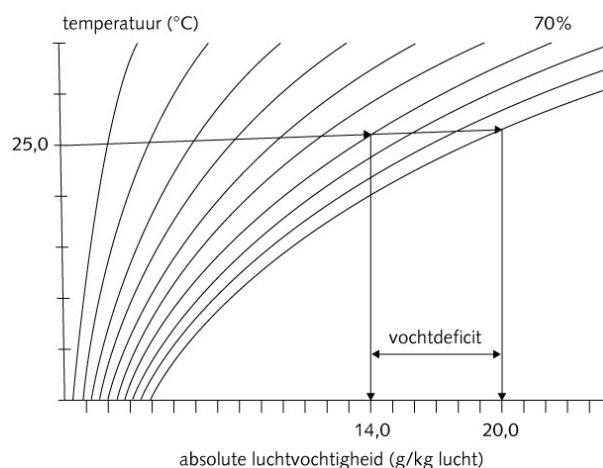
(Wikiwijs)

De AV wordt afgelezen door bij een bepaalde temperatuur een horizontale lijn te trekken naar rechts tot deze de lijn raakt van de op voorhand bepaalde relatieve vochtigheid. Vanaf dat punt wordt er een rechte lijn naar onder getrokken waar zich waarden bevinden voor de AV in g/kg.

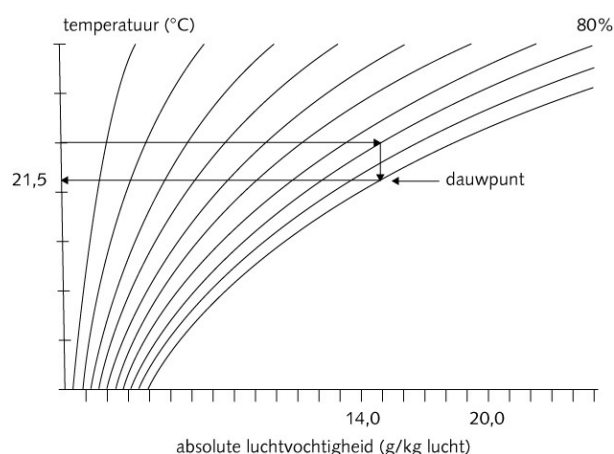
De VV wordt afgelezen door bij een bepaalde temperatuur een horizontale lijn te trekken naar rechts tot deze de lijn raakt van 100% relatieve vochtigheid. Vanaf dat punt wordt er een rechte lijn naar onder getrokken waar zich waarden bevinden voor de VV in g/kg.

Het vochtdeficit is het verschil tussen de AV en VV en is de hoeveelheid vocht die bijvoorbeeld toegevoegd dient te worden om condensatie op te laten treden bij een vastgestelde temperatuur (zie Figuur 2).

Het dauwpunt, zoals omschreven in [paragraaf 2.5](#), is de temperatuur waarbij het vochtgehalte verzadigd is. Om deze waarde af te lezen dient er bij een bepaalde temperatuur een horizontale lijn naar rechts getrokken te worden tot deze de lijn raakt van de op voorhand bepaalde relatieve vochtigheid. Vanaf dit punt wordt er een verticale lijn naar onder getrokken tot deze de lijn van 100% relatieve vochtigheid raakt. Vanaf hier kan horizontaal naar links de temperatuur worden afgelezen (zie Figuur 3).



Figuur 2: het Mollierdiagram - vochtdeficit aflezen, bron data; (Wikiwijs)



Figuur 3: het Mollierdiagram - dauwpunt aflezen, bron data; (Wikiwijs)

Door middel van het Mollierdiagram kan voorspeld worden hoe bepaalde klimaten gesimuleerd kunnen worden. Het dient gebruikt te worden als begeleiding bij het maken van de simulaties. Temperatuur en luchtvochtigheid hebben een sterke relatie met elkaar en beïnvloeden elkaar. Deelonderzoek; meetmethodes en (meet)apparatuur gaat nader in op deze relatie in de praktijk.

2.9. Dampdiffusie(weerstand)

De dampdiffusieweerstand is de weerstand die een materiaal biedt tegen de hoeveelheid waterdamp zich door het materiaal verplaatst. Deze is tevens afhankelijk van de dikte van het materiaal. Het dampdiffusieweerstandsgetal is een constante waarde waarmee waterdamp door een materiaal beweegt, waarbij de dikte niet wordt meegerekend.

Een μd -waarde van 20m geldt als sterk dampremmend (Bouwcentrum advies).

Een μd -waarde van 0,50m voor een enkel materiaal geldt als dampopen (Prinsen, 2015).

Volgens A. Tilmans en T. De Mets (2017) is een wand dampopen als de equivalente Sd-waarde kleiner is dan 3m.

$$Z_n = 5,3 \times 10^9 \times \mu_n \times d_n \quad [\text{m/s}] \quad (10)$$

Z_n = (water)damp(diffusie) weerstand van een homogene laag (n). [m]

μ = de mu-waarde van het materiaal, diffusieweerstandsgetal [-]

d_n = de dikte van laag 'n'. [m]

$$Sd = \mu \times d \quad [\text{m}] \quad (11)$$

Bij een vlakke, gelaagde constructie kunnen de afzonderlijke μd -waarden van de lagen worden opgeteld volgens:

$$Z_n = 5,3 \times 10^9 (\mu_1 d_1 + \mu_2 d_2 + \dots) \quad [\text{m/s}] \quad (12)$$

Als dampovergangsweerstanden zijn aan te houden:

$$Z_i = 40 \times 10^6 \text{ (binnen)} \quad [\text{m/s}] \quad (13)$$

$$Z_e = 7 \times 10^6 \text{ (buiten)} \quad [\text{m/s}] \quad (14)$$

De μ -waarde (dampdiffusieweerstandsgetal) van een homogeen materiaal kan bepaalde worden door middel van andere testen zoals de bekermethode (NEN-EN-ISO 12572, 2016) en boxmethode (NEN-ISO 21129, 2007). Om de Z_n te kunnen bepalen in de voorgenoemde vergelijkingen (10), (12), (13) en (14), dient deze μ -waarde bekend te zijn. Tevens is er een μd -waarde (Sd-waarde) weergegeven. Deze waarde wordt weergegeven in meters en wordt berekend door de μ -waarde te vermenigvuldigen met de dikte van het materiaal. Deze waarde wordt vaker gebruikt omdat deze makkelijker te gebruiken is dan de waarde Z_n vanwege de factor 10^9 . De μd -waarde geeft de weerstand weer van een materiaal ten opzichte van de weerstand van lucht met dezelfde dikte. Indien een materiaal met een bepaalde dikte een μd -waarde van bijvoorbeeld 70m heeft, heeft deze een dampdiffusieweerstand gelijk aan een laag lucht met een dikte van 70m (Joost de Vree). "Hoe hoger de μd - of sd-waarde, hoe beter het materiaal in staat is damp tegen te houden." - (Joost de Vree)

2.10. Damptransport (water)

De damptransport is de snelheid waarmee een hoeveel massa water wordt verplaatst in een bepaalde oppervlakte. De damptransport is een gevolg van dampspanningsverschillen tussen vlakken in combinatie met dampdiffusieweerstanden van lagen die zich tussen deze vlakken bevinden.

$$g = \frac{p_1 - p_2}{Z} \quad (15)$$

Z = (totale dampweerstand van materiaal tussen twee vlakken. [m/s]
 P = werkelijke dampspanning [Pa]
 G = dampstroomdichtheid [kg/m²s]

$1 \text{ kg/m}^2\text{s} = 86,4 \times 10^6 \text{ g/m}^2 \text{ per etmaal}$

De hoeveelheid g_{con} , die op een oppervlak condenseert valt te berekenen uit:

$$g = \frac{p_i - p_{so}}{40 \times 10^6} \quad (16)$$

p_i = de werkelijke dampspanning binnen [Pa]
 p_{so} = de maximale dampspanning die bereikt kan worden bij een oppervlaktetemperatuur [Pa]

Op gladde niet vochtdoorlatende oppervlakken kan ca. 20 g/m² waterdamp condensereren zonder storende druppelvorming.

3. Software op vochttransport

Er bestaan verschillende softwarepakketten om de thermohygrische prestaties te toetsen. Het rapport naar 'risico's van inwendige condensatie in een externe scheidingsconstructie' door S. Uittenbosch (2012) beschrijft dat Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC) een overzicht heeft gemaakt van hygrothermische modellen waarin 45 computermodellen zijn onderzocht. Deze modellen zijn vergeleken met elkaar, waarbij de verschillen tussen de modellen kunnen zijn; *"keuze van de vochtpotential, vertegenwoordiging van materiaaleigenschappen, transportmechanisme, omgaan met de randvoorwaarden en de mate van validatie."* - (Uittenbosch, 2012). Tabel 3 geeft een deelloverzicht van softwarepakketten met bijhorende eigenschappen weer. Deze tabel is overgenomen uit het rapport van Uittenbosch, vanwege gebrek aan ervaring met de thermohygrische softwarepakketten.

Programma	Samenvatting	Dimensie	Potentiaal	Mechanisme
WUFI	mogelijk om 1- of 2D-warmte- en vochttransport in een meerlaagse samenstelling te modelleren. De tool kan gebruik maken van gemeten weergegevens, inclusief wind en regen. Voor het vochttransport is de relatieve vochtigheid de potentiaal. Daarnaast beschikt WUFI over een materiaal database. Echter wordt het programma niet gebruikt met convectie, omdat dit probleem alleen voor komt bij defecten en daarom moeilijk is om op voorhand te voorspellen. Slechts driedimensionale dynamische simulatiemodellen kunnen convectie realistisch modelleren (Kunzel, 1995, Holm, 2000 en WUFI).	1- Of 2D	RV	Diffusie en vloeistoftransport
MOIST	modelleert 1D warmte- en vochtoverdracht in een gebouwschil. Het programma beschikt daarbij over de mogelijkheid om onderzoek te doen naar schimmelgroei als gevolg van vochtophoping. Als	1D	Pv en Pc	Diffusie en vloeistoftransport

potentiaal wordt de capillaire druk genomen voor vloeistoftransport en dampdruk voor diffusie (Burch et al., 1997).

UMIDUS	modelleert 1D warmte- en vochtoverdracht in poreuze bouwelementen. Hier worden zowel diffusie als capillaire effecten meegenomen (UMIDUS, Kwiatkowski, 2009).	1D	?	Diffusie en vloeistoftransport
DELPHIN	is een 2D model voor warmte, lucht en vochttransport. Daarnaast kan het programma zouttransport in poreuze materialen simuleren. Voor de vochtpotential wordt de dampdruk genomen (DELPHIN, Kwiatkowski, 2009).	2D	Pv en Pc	Diffusie, convectie en vloeistoftransport
EMTIED	is een 1D model voor warmte- en vochttransport, met daarbij luchtlekkage, die de kans op condensatie voorspelt. Dit programma is een 'black-box', want de theorie achter het model is niet gedocumenteerd (Kwiatkowski, 2009).	1D	?	Diffusie en convectie
GLASTA	Is een 1D model voor warmte en vochttransport. Het is gebaseerd op de Glaser-methode, met als extra toevoeging de capillaire distributie (GLASTA, Kwiatkowski, 2009).	1D	Pv	Diffusie en vloeistoftransport
MATCH	is een 1D model voor vochttransport als gevolg van diffusie en capillaire druk (MATCH, Kwiatkowski, 2009).	1D	?	Diffusie en vloeistoftransport
1D-HAM	modelleert 1D het warmte, lucht- en vochttransport in een meer-laags constructie. Echter wordt vloeistoftransport niet meegenomen in dit model. Vocht wordt gemodelleerd met het vochtgehalte als potentiaal (Kwiatkowski, 2009).	1D	W	Diffusie en convectie

Tabel 3: overzicht softwarepakketten; data bron (Uittenbosch, 2012).

Uittenbosch (2012) concludeert naar aanleiding van eerdere onderzoeken door Kalamees et al. (2003) dat de softwarepakketten 1D-HAM, MATCH en WUFI 2D nuttige hulpmiddelen zijn bij het beoordelen van het vochtgedrag als gevolg van diffusie, waarbij vocht als gevolg van convectie niet is meegenomen. Uittenbosch geeft aan dat Janetti et al. (2011) beschrijft dat commerciële programma's zoals WUFI en DELPHIN vaak beperkt zijn tot twee dimensionale studies en niet in staat zijn convectieve overdracht te modelleren. Echter blijkt uit de praktijk dat convectie van grote invloed is. Echter is eerder besloten in deelonderzoek 1, dat wind en zonlicht worden uitgesloten in dit onderzoek en daarbij ook convectie. Tevens wordt uitgegaan dat er uitsluitend luchtdichte gevelconstructies getest worden, dat tevens een eis is bij dampdiffusie open bouwen (zie deelrapport 1).

Indien gewenst is dit mee te nemen, is COMSOL Multiphysics het juiste instrument volgens Janetti et al. (2011), vanwege de mogelijkheid om 3D geometrieën te simuleren en de flexibiliteit met betrekking tot de koppeling met 'Computational Fluid Dynamics'. Echter in is dit onderzoek een 3D geometrische simulatie niet van belang, omdat het gaat om de vochtophoping binnen in een dampdiffusie open gevelconstructie. Waarbij een simulatie in 1D of 2D voldoende zou zijn om de juiste informatie te (weer)geven.

Computersoftware is vooral in staat om op voorhand ontworpen situaties te kunnen simuleren. Dit kan tevens vergeleken worden met de gegevens afkomstig uit experimenten. Echter is het doel van dit onderzoek een testopstelling te ontwikkelen waarbij de zojuist genoemde experimenten uit te voeren. Het is eerder van belang hard- en software te bevatten die gegevens uit sensoren kan weergeven en opslaan. Hierbij dient gezocht te worden naar dataloggers die beschikken over een intern geheugen en meten met een ingebouwde of externe sensor. Deze dataloggers kunnen gekoppeld worden aan computers, waarnaar zij de gegevens kunnen doorsturen. Naast deze dataloggers is er software nodig die deze gegevens kunnen weergeven en gebruiken. Deelrapport 4: Meetmethodes en (meet)apparatuur omschrijft meer over

de benodigde (meet)apparatuur, sensoren en hard- & software. In de software pakketten zijn de thermohygrische eigenschappen vaak al verwerkt en het is daarom niet nodig om zelf berekeningen te maken. Tevens is het niet mogelijk om handmatig berekeningen te maken, zoals eerder omschreven in [paragraaf 2.6](#). Dampdiffusie open bouwen vereist het gebruik van dynamische berekeningen die uitsluitend uitvoerbaar zijn door middel van computersoftware. Concluderend kan worden gesteld dat het 3D simuleren van het vochttransport niet benodigd is binnen deze testopstelling. Zoals eerder genoemd is een 1D of 2D simulatie voldoende voor deze testopstelling.

4. Conclusie

Thermohygrische eigenschappen zijn in het algemeen de bouwfysische eigenschappen van een materiaal met betrekking tot vocht- en warmteoverdracht. Hieronder vallen meerdere eigenschappen, echter zijn de volgende eigenschappen van toepassing in dit onderzoek:

- Temperatuur
- Absolute vochtigheid
- Relatieve vochtigheid
- Dampspanning (-druk)
- Dampdiffusie (weerstand)
- Damptransport

In overleg met de opdrachtgever is besloten dat het onderzoek gericht is op Nederlandse klimatologie. Hierbij wordt in Nederland de temperatuur veelal aangeduid met graden Celsius (of $0\text{ °K} = -273,15\text{ °C}$). Waterdampspanning is een complex principe en de berekening hiervan wordt op meerdere mogelijkheden gegeven. Het verschil tussen de verschillende berekeningen zit hem vaak in de nauwkeurigheid van het resultaat. Ook verschillen deze per temperatuur bereik. In de bouw wordt overigens vaak gewerkt met een **dampspanningstabel** (Tabel 4 in bijlagen) waarin per temperatuur de maximaal toelaatbare dampspanning (verzadigde dampspannings) is weergegeven. Naar aanleiding van de absolute vochtigheid kan de relatieve vochtigheid bepaald worden. Het **Mollier diagram** (Figuur 4 in bijlagen) toont de verhouding tussen de temperatuur en de luchtvochtigheid. Door deze diagram juist af te lezen kan het dauwpunt en condensatie voorspeld worden.

Deelonderzoek 1: dampdiffusie open bouwen, beschrijft dat een gevel zodanig ontworpen dient te worden dat inwendige condensatie voorkomen wordt. Condensatie ontstaat als de relatieve vochtigheid 100% is en dus verzadigd is. Dit gebeurt in de praktijk vooral als de temperatuur daalt en daardoor de lucht minder vocht kan bevatten. Ook kan de relatieve vochtigheid verhoogd worden totdat deze 100% bereikt bij een gelijkblijvende temperatuur. Inwendig condensatie bij een constante temperatuur en relatieve vochtigheid, kan berekenend worden door middel van de Glaser methode omschreven in NEN-EN-ISO 13788: 2013. Deze methode is geschikt om extreme situaties te bepalen. Echter voor een dynamische berekening biedt deze methode niet voldoende capaciteit. Tegenwoordig zijn er softwaremodellen beschikbaar die een dynamische berekeningen kunnen maken dat tevens vereist is bij dampdiffusie open bouwen.

Een belangrijk aspect is dampdiffusie, waarbij de dampdiffusieweerstand van een materiaal bepaald tot in hoeverre het materiaal waterdamp doorlaat. Het dampdiffusieweerstandsgetal (μ -waarde) kan bepaald worden door middel van verschillende normen. Deze normen worden behandeld in deelonderzoek; wet- en regelgeving. Door deze μ -waarde te vermenigvuldigen met de dikte van het materiaal kan de μ d-waarde (S_d -waarde) worden bepaald die een verhouding geeft van de weerstand van het product ten opzicht van de weerstand van lucht met dezelfde dikte als het desbetreffende product.

Een μd -waarde van 20m geldt als sterk dampremmend. Een μd -waarde van 0,50m voor een enkel materiaal geldt als dampopen. Maar spreekt men over een samengestelde gevelconstructie dan wordt 3m gezien als dampopen. Er is bevonden dat deze S_d -waarde nog wel eens kunnen verschillen. Het is daarom nog niet vast te stellen welke waarde bepalend is.

"Hoe hoger de μd - of s_d -waarde, hoe beter het materiaal in staat is damp tegen te houden." - (Joost de Vree)

Softwarepakketten zijn niet direct van belang bij deze testopstelling, omdat deze een voorspelling maken van het vochttransport. Het doel van deze testopstelling is om data waar te nemen door middel van sensoren (zie deelrapport 4: meetmethodes & (meet)apparatuur). Wel is het mogelijk de software te gebruiken om deze verkregen data in te voeren. Dit betekent dat de software pas gebruikt wordt nadat de test is uitgevoerd, indien er een mogelijkheid is de software direct te koppelen aan de testopstelling. Vanwege gebrek aan deskundigheid is niet onderzocht of dit mogelijk is en is het aanbevolen dat een deskundige hier nader onderzoek naar doet.

5. Literatuurlijst

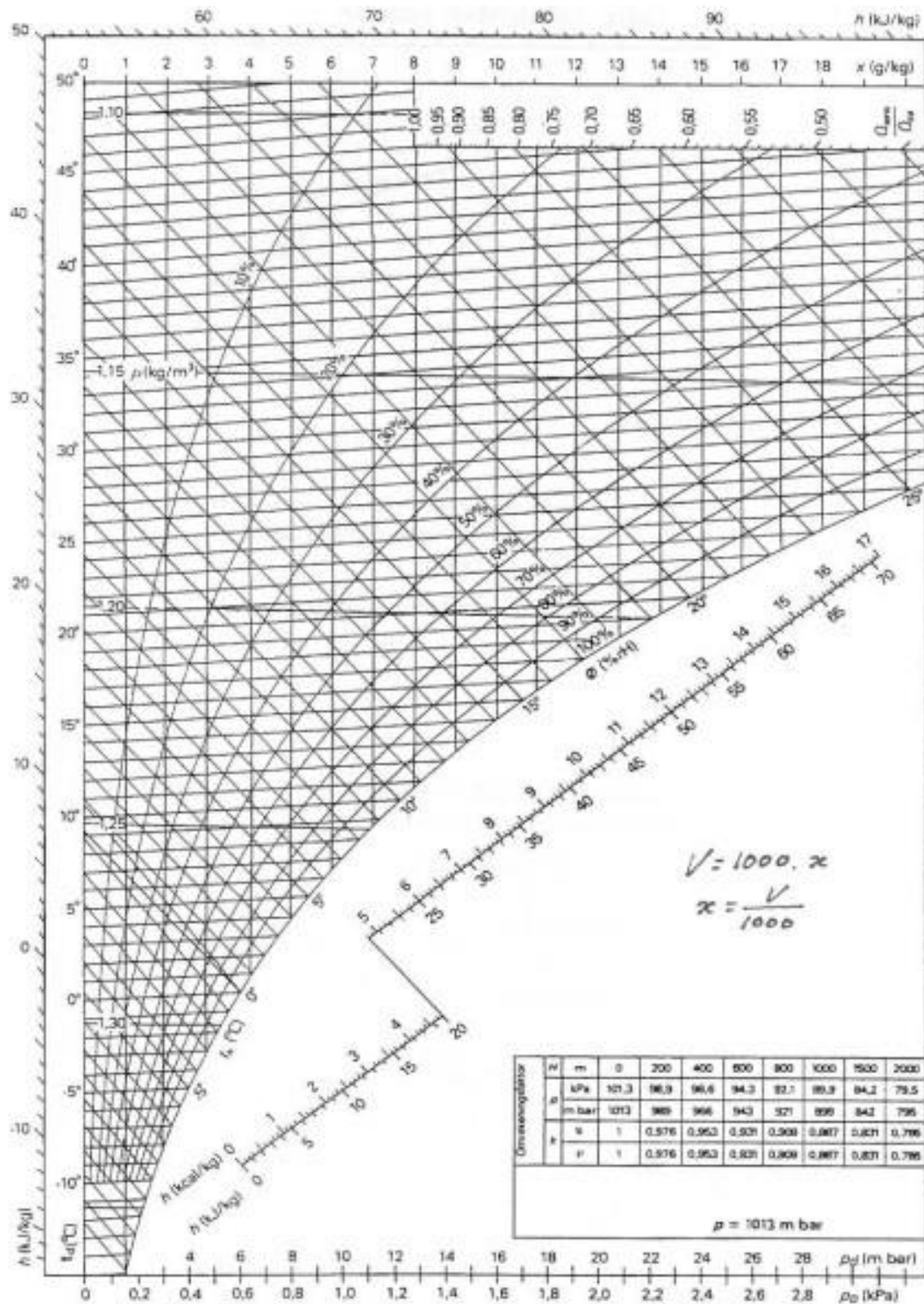
- Architecten Gilde. (sd). *Bouwfysica tabellarium overzicht materiaaleigenschappen*. Opgehaald van Architecten Gilde: http://www.architectengilde.nl/wp-content/uploads/2013/09/Bouwfysica_tabellarium_overzicht_materiaaleigenschappen.pdf
- Bouwcentrum advies. (sd). *Bouwfysica tabellarium*. Opgehaald van Joost de Vree: http://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgb/bouwfysisch_tabellarium_www_bouwcentrum-advies_nl.pdf
- Daidalos Peutz bouwfysisch ingenieursbureau. (2007). *Nieuwe technieken in de klimatisatie*. Schelle: Vereniging voor Technische Diensthoofden in de.
- Hendriks, R. (sd). *Gassen en dampen*. Opgehaald van Roehendriks: <http://www.roelhendriks.eu/Natuurkunde/w3B%20gassen%20en%20dampen/gassen%20theorie.pdf>
- Internationale woordenboek. (2017). *Thermo*. Opgehaald van Internationale woordenboek: http://internationale-woordenboek.com/definitions/?dutch_word=thermo-
- Janetti, M., Ochs, F., Feist, W., & Uittenbosch, S. (2011, Oktober 26-28). 3D Simulation of Heat and Moisture Diffusion in Constructions. *European Comsol Conference*. Stuttgart.
- Jong, R. d. (2013). *Achtergrondrapport bouwfysica buitengevelisolatiesystemen*. Tiel: Sto Isoned B.V.
- Joost de Vree. (sd). *Dampdiffusieweerstand*. Opgehaald van Joost de Vree: <http://www.joostdevree.nl/shtmls/dampdiffusie.shtml>
- Kalamees, T., Vinha, J., & Uittenbosch, S. (2003). ygrothermal calculations and laboratory tests on timber-framed wall. *Building and Environment* 38, pp. 689 – 697.
- KIWA N.V. (2004, 1 7). BRL 1309. *Nationale beoordelingsrichtlijn 1309*. Culemborg, Nederland: INTRON Certificatie B.V.
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2007). *NEN-ISO 21129*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut.
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2013). *NEN-EN-ISO 13788*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. Opgehaald van NEN: https://www.nen.nl/pdfpreview/preview_179390.pdf
- Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2016). *NEN-EN-ISO 12572*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut.
- Prinsen, N. (2015, Juli). *Dampopen bouwen doe je zo*. Delft, Zuid Holland, Nederland: SBRCURnet.
- Printable Diagram. (2014, November 9). *Mollier diagram pdf*. Opgehaald van Printablediagram: <http://www.printablediagram.com/mollier-diagram/mollier-diagram-pdf/>
- Stybenex. (sd). *Basisinformatie*. Opgehaald van Stybenex: <http://stybenex.nl/documentatie/basisinformatie/>
- Tilmans, A., & De Mets, T. (2017, Februari). *Dampopen wanden*. Opgehaald van WTCB: <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact54&art=824>
- Uges, P. (sd). Het Mollierdiagram in theorie en praktijk. *RCC koude & luchtbehandeling*. Opgehaald van Airco-Kenniscentrum.

Uittenbosch, S. (2012). *Risico van inwendige condensatie in een externe*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.

van Dale Uitgevers. (sd). *Temperatuur*. Opgehaald van van Dale:
<http://www.vandale.nl/opzoeken?pattern=temperatuur&lang=nn>

Wikiwijs. (sd). *Mollierdiagram*. Opgehaald van Maken Wikiwijs:
<https://maken.wikiwijs.nl/bestanden/64849/RV%20en%20temperatuur.pdf>

Bijlagen



Figuur 4: Mollierdiagram, bron data; (Printable Diagram, 2014).

Maximale waterdampconcentratie en waterspanning in afhankelijkheid van de temperatuur

$c_{\max}$ g/m ³	Temp. °C	De verzadigde waterdampspanning p_s in N/m ²									
		,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
39,56	+ 35	5627	5657	5688	5720	5752	5784	5816	5848	5880	5912
37,54	34	5323	5352	5381	5412	5443	5472	5503	5533	5564	5595
35,62	33	5033	5061	5090	5118	5146	5176	5205	5234	5264	5293
33,77	32	4757	4785	4812	4838	4866	4893	4921	4949	4977	5005
32,02	31	4496	4521	4546	4573	4598	4625	4650	4677	4704	4730
30,34	30	4245	4270	4294	4319	4344	4369	4393	4418	4443	4469
28,73	29	4007	4031	4054	4078	4102	4125	4149	4173	4197	4221
27,21	28	3782	3803	3826	3848	3871	3893	3915	3939	3962	3984
25,75	27	3567	3588	3610	3630	3651	3674	3695	3716	3738	3760
24,36	26	3363	3383	3403	3423	3443	3463	3484	3504	3530	3546
23,05	25	3169	3188	3207	3226	3246	3264	3284	3303	3323	3343
21,78	24	2985	3003	3022	3040	3058	3076	3095	3114	3132	3151
20,55	23	2811	2828	2844	2861	2879	2896	2915	2932	2949	2967
19,43	22	2645	2661	2677	2693	2710	2727	2744	2760	2778	2793
18,35	21	2488	2504	2518	2535	2549	2565	2581	2597	2613	2629
17,28	20	2340	2353	2368	2382	2397	2412	2428	2442	2457	2473
16,30	19	2198	2212	2225	2240	2253	2268	2281	2296	2310	2325
15,37	18	2065	2077	2090	2104	2117	2130	2144	2157	2170	2184
14,47	17	1938	1950	1962	1978	1988	2001	2014	2026	2034	2052
13,65	16	1818	1830	1842	1854	1866	1878	1890	1902	1914	1926
12,85	15	1706	1717	1728	1739	1750	1761	1773	1784	1796	1808
12,07	14	1599	1609	1619	1630	1641	1651	1662	1673	1684	1696
11,35	13	1498	1507	1518	1527	1538	1547	1558	1569	1578	1589
10,65	12	1403	1413	1422	1431	1441	1450	1459	1469	1478	1489
10,01	11	1313	1321	1331	1339	1349	1358	1366	1375	1385	1394
9,40	10	1229	1237	1245	1253	1262	1270	1278	1287	1295	1305
8,82	9	1148	1156	1164	1172	1179	1187	1195	1203	1212	1220
8,27	8	1072	1080	1087	1095	1103	1110	1118	1126	1132	1140
7,76	7	1002	1008	1016	1023	1030	1036	1044	1051	1059	1066
7,28	6	935	942	948	955	962	968	975	982	988	995
6,83	5	872	879	884	891	898	903	910	916	923	928
6,40	4	814	819	826	831	836	843	848	855	860	867
5,99	3	758	763	768	775	780	786	791	796	802	808
5,59	2	706	711	716	722	727	732	736	742	747	752
5,21	1	657	661	667	671	676	681	685	691	696	701
4,84	+ 0	611	615	620	624	628	633	637	643	647	652
4,84	- 0	611	605	600	596	591	587	581	576	572	567
4,48	- 1	563	557	553	548	544	539	535	531	525	521
4,14	- 2	517	513	508	504	500	496	492	488	484	480
3,82	- 3	476	472	468	464	460	456	452	448	444	440
3,53	- 4	437	433	429	425	423	419	415	412	408	404
3,26	- 5	401	397	395	391	388	384	381	377	375	371
3,01	- 6	368	365	361	359	356	352	349	347	344	340
2,77	- 7	337	335	332	329	327	323	320	317	315	312
2,55	- 8	309	307	304	301	299	296	293	291	288	285
2,34	- 9	283	281	279	276	273	271	269	267	264	261
2,15	- 10	260	257	255	252	251	248	245	244	241	240
1,98	- 11	237	235	233	231	229	227	225	223	221	219
1,82	- 12	217	215	213	211	209	207	205	204	201	200
1,67	- 13	199	196	195	193	191	189	188	185	184	183
1,53	- 14	181	179	177	176	175	173	171	169	168	167
1,41	- 15	165	164	163	160	159	157	156	155	153	152
1,29	- 16	151	149	148	147	145	144	143	141	140	139
1,18	- 17	137	136	135	133	132	131	129	128	127	125
1,08	- 18	124	124	123	121	120	119	117	116	116	115
0,99	- 19	113	112	111	111	109	108	107	105	105	104
0,90	- 20	103	101	101	100	98,7	98,7	97,4	96,0	94,7	94,7

Tabel 4: dampspanningstabel

Two vertical bars, one orange and one green, are positioned on the right side of the page.

Bijlage

III



Wet- & regelgeving en normen voor dampdiffusie open bouwen

Wat is de Nederlandse wet- & regelgeving en normen voor dampdiffusie open gevelconstructies en metingen?

Deelonderzoek
Versie 1

Auteur: Y. Verhoeven
Studentnummer: 66801
Opleiding: Bouwkunde Voltijd

HZ University of Applied Sciences
1^e begeleider: I. Weegels
2^e begeleider: B. Vercouteren

Centre of Expertise Biobased Economy,
lectoraat biobased bouwen
Stagebegeleider: W. Böttger

Inhoud

1.	INLEIDING	1
2.	WET- & REGELGEVING EN NORMEN.....	1
2.1.	BOUWBESLUIT	1
2.2.	NEDERLANDSE NORMALISATIE INSTITUUT	2
2.1.1	<i>Beker en box methode</i>	5
2.1.2.	<i>Lage dampdiffusie weerstand</i>	6
2.1.3.	<i>Damdoorlatendheid thermische isolatie</i>	6
2.1.4.	<i>"Hot Box" normen</i>	6
3.	CONCLUSIE	7
	BIBLIOGRAFIE.....	9

1. Inleiding

Een testopstelling wordt gebruikt om eindproducten te kunnen testen of deze aan eisen en randvoorwaarden voldoen. De eisen en randvoorwaarden die gesteld zijn kunnen landelijk vastgesteld staan in een wet- of regelgeving. Opdrachtgevers kunnen randvoorwaarden en richtlijnen geven, waaraan een product dient te voldoen. Deze zijn wettelijk niet vereist, maar is echter een eis van de opdrachtgever. Om de thermohygrische eigenschappen van het eindproduct te kunnen waarborgen worden deze wet- & regelgeving en normen in beeld gebracht. De testopstelling die in dit onderzoek wordt ontwikkeld is een vrij onbekend concept. Er wordt hierbij onderzocht of er bestaande wetten en normen bestaan die een richtlijn geven over hoe dit soortgelijke testen wettelijk uitgevoerd dienen te worden.

2. Wet- & regelgeving en normen

In dit onderzoek is uitsluitend gekeken naar de Nederlandse wetgeving, omdat de wetgeving internationaal per land dusdanig verschilt, dat het onderzoeken hiervan teveel manuren kost en tevens irrelevant is. De Nederlandse wetgeving binnen de bouwsector is beschreven in het Staatsblad der Koninkrijk der Nederlanden 416: Besluit van 29 augustus 2011 houdende vaststelling van voorschriften met betrekking tot het bouwen, gebruiken en slopen van bouwwerken (2011). Dit deelonderzoek is uitsluitend gedaan naar de normen goedgekeurd door het Koninklijke Nederlandse Normalisatie-instituut (NEN). Dit is inclusief Europese (NEN-EN) en internationale normen (NEN-EN-ISO).

2.1. Bouwbesluit

In het Bouwbesluit 2012 (Donner, 2011) is geen wetgeving weergegeven die beschrijft waar dampdiffusie open gevelconstructies aan dienen te voldoen met als gevolg dat er ook geen wetgeving aanwezig is op hoe deze constructies getest dienen te worden. Buiten om het feit dat er geen wetgeving bestaat op dampdiffusie open bouwen, dient er te allen tijde rekening gehouden te worden met de overige wetgeving. Dit houdt in dat gevelconstructies die in de testopstelling geplaatst worden, buitenom de resultaten van de dampdiffusie ook dienen te voldoen aan overige bouwbesluit eisen waaronder bijvoorbeeld;

- o een Rc-waarde van $4,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ aangehouden dient te worden voor uitwendige scheidingsconstructies;
- o er geen openingen mogen zijn, groter dan 0,1m indien er geen sprake is van een voorziening van luchtverversing, een afvoervoorziening voor rookgas, een ont- en beluchting van een afvoervoorziening voor huishoudelijk afvalwater en hemelwater of dat er een uitzondering wordt toegestaan in verband met hoofdstuk 3 van de Wet natuurbescherming;
- o de sterkte bij brand en het voorkomen van uitbreiding bij brand;
- o een uitwendige scheidingsconstructie van een verblijfsgebied een volgens NEN 5077 bepaalde karakteristieke geluidwering met een minimum van 20 dB heeft;
- o bij wering tegen vocht, waaronder; De uitwendige scheidingsconstructie van een bergruimte als bedoeld in artikel 4.31 is, bepaald volgens NEN 2778, regenwerend;
- o Et cetera.

2.2. Nederlandse Normalisatie Instituut

Nederlandse Normalisatie Instituut (NEN) houdt zich bezig met het opstellen en ontwikkelen van normen. Zij onderzoeken in hoeverre normalisatie mogelijk is en er interesse voor bestaat. Samen met alle belanghebbende partijen worden er afspraken gemaakt die de normen vormen. Deze afspraken mogen niet in conflict zijn met andere normen. Tabel 1 geeft een overzicht van weer van normen die toepasbaar zijn in dit onderzoek met betrekking tot dampdiffusie. Er zijn in eerste instantie normen geselecteerd die betrekking hadden tot dampdiffusie. Vervolgens zijn deze normen nader onderzocht, waarbij is bepaald tot in hoeverre deze van toepassing zijn in dit onderzoek. Dit wordt in Tabel 1 in drie kleuren weergegeven. De niet interessante normen staan ook in dit overzicht met als doel dat deze niet vaker onderzocht hoeven te worden. Tabel 1 is zodanig opgesteld dat in de laatste kolom de toepassing staat beschreven. In deze 'toepassing' wordt nader omschreven wat deze norm voor de ontwikkeling van de testopstelling kan betekenen.

Groen	Is wel van toepassing binnen dit onderzoek.
Geel	Is niet direct van toepassing, maar wel interessant binnen dit onderzoek.
Rood	Is niet van toepassing binnen dit onderzoek.

Norm			Titel	Toepassing
NEN-EN	772-15	:2000 en	Beproeversmethoden voor metselstenen - Deel 15: Bepaling van de waterdampdoorlatendheid van cellenbeton	Kan gebruikt worden om de μ -waarde te bepalen.
NEN-EN	1015-19	:1998/A1:2014 en	Beproeversmethoden voor mortel voor metselwerk - Deel 19: Bepaling van waterdampdoorlatendheid van verharde pleistermortels	Kan gebruikt worden om de μ -waarde te bepalen.
NEN	1068+C2	:2012	Thermische isolatie van gebouwen - Rekenmethoden	
NEN-EN	1931	:2000 en	Flexibele banen voor waterafdichtingen - Bitumen, kunststof en rubber banen voor waterafdichtingen voor daken - Bepaling van de eigenschappen van waterdampdoorlatendheid	Kan gebruikt worden om de μ -waarde te bepalen.
NEN-ISO	2528	:1996 en	Materialen in vellen - Bepaling van de waterdampdoorlatendheid - Gravimetrische (schotel) methode	Kan gebruikt worden om de μ -waarde te bepalen.
NEN	2778	:2015 nl	Vochtwering in gebouwen	Voor het bepalen en berekenen van vocht in gebouwen.
NEN	5060	:2008 nl	Hygrothermische eigenschappen van gebouwen - Referentieklimaatgegevens.	
NEN-EN-ISO	6946	:2008 en	Componenten en elementen van gebouwen - Warmteweerstand en warmtedoorgangscoefficient - Berekeningsmethode	
NEN-EN-ISO	7726	:2001 en	Ergonomie van de thermische omgeving - Instrumenten voor het meten van fysische grootheden	Kan gebruikt worden voor het bepalen van de criteria bij het toepassen van apparatuur.

NEN-EN-ISO	7730	:2005	<i>Klimaatomstandigheden - Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid</i>	Kan worden toegepast bij het omzetten van primaire waarden naar parameters bedoeld voor binnenklimaten zoals bedoeld in de methode; Fanger, GTO & ATG (zie deelonderzoek; dampdiffusie open bouwen).
NEN-EN-ISO	7783	:2011 en	<i>Verven en vernissen - Bepaling van eigenschappen van waterdampdoorlatendheid – Kroesmethode</i>	Kan gebruikt worden om de μ -waarde te bepalen.
NEN-EN-ISO	9346	:2007 en	<i>Hygrothermische prestatie van gebouwen en bouwmaterialen - Fysische grootheden voor massa transport - Termen, definities en symbolen.</i>	Kan gebruikt worden voor grootheden, termen, definities en symbolen.
NEN-EN-ISO	10456	:2008/C1:2009 en	<i>Bouwmaterialen en bouwproducten - Hygrothermische eigenschappen - Overzicht van ontwerpwaarden en procedures voor de bepaling van gedeclareerde en ontwerp waarden.</i>	Voor dampdiffusie-weerstand wordt verwezen naar ISO 12572 'bekermethode'. Wel staan μ -waarde weergegeven in deze norm.
NEN-EN	12086	:2013 en	<i>Materialen voor de thermische isolatie van gebouwen - Bepaling van de waterdampdoorlatendheidseigenschappen.</i>	Kan gebruikt worden om de μ -waarde te bepalen.
NEN-EN	12524	:2000 nl	<i>Bouwmaterialen en bouwproducten - Warmte- en vochtwerende eigenschappen - Overzicht van ontwerpwaarden</i>	Kan gebruikt worden bij het ontwerpen van verschillende gevelconstructies.
NEN-EN-ISO	12571	:2013 en	<i>Hygrothermische eigenschappen van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van de hygroscopische absorptie-eigenschappen.</i>	
NEN-EN-ISO	12572	:2016 en	<i>Vochteigenschappen van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van de waterdampdoorlatendheid - Bekermethode</i>	Kan gebruikt worden om de μ -waarde te bepalen.
NEN-EN-ISO	13731	:2002 en;fr	<i>Ergonomie van de thermische omgeving - Woordenlijst en symbolen</i>	
NEN-EN-ISO	13788	:2013 en	<i>Hygrothermische prestatie van bouwcomponenten en -elementen - Binnenoppervlaktetemperatuur om kritische oppervlaktevochtigheid en inwendige condensatie te vermijden – Berekeningsmethode.</i>	Hiermee kan de inwendige condensatie berekend worden volgens de Glaser methode. Dit is ook terug te vinden binnen softwarepakketten.
NEN-EN-ISO	14268	:2012 en	<i>Leer - Fysische en mechanische beproevingen - Bepaling van de waterdampdoorlatendheid</i>	
NEN-EN	15026	:2007 en	<i>Hygrothermische prestatie van bouwcomponenten en -elementen - Beoordeling van vochtoverdracht door rekenkundige simulatie.</i>	Kan gebruikt worden bij het maken van een simulatie voor een dynamische vochttransport binnen een bouwwerk.

NEN-EN-ISO	15106-1	:2005 en	Kunststoffolie en -plaat - Bepaling van de waterdampdoorlatendheid - Deel 1: Vochtigheidsdetectie sensormethode	Bepaald hoe je vocht moet waarnemen met sensoren.
NEN-EN-ISO	15148	:2003/A1:2016 en	Hygrothermische prestatie van bouwmaterialen en producten - Bepaling van de waterabsorptie door gedeeltelijke onderdompeling.	
NEN-EN-ISO	15927	Deel 1	Hygro-thermische eigenschappen van gebouwen - Berekening en weergave van klimatologische gegevens.	Kan gebruikt worden voor het bepalen van een buitenklimaat (simulatie).
NEN-EN	16383	:2016 en	Materialen voor de thermische isolatie van gebouwen - Bepaling van het hygrothermisch gedrag van externe thermische isolatie van samengestelde systemen met bepleistering (ETICS).	
NEN-ISO	21129	:2007 en	Hygrothermische prestatie van bouwmaterialen en producten - Bepaling van de waterdoorlatendheid - Boxmethode.	Kan gebruikt worden om de μ -waarde te bepalen voor dampopen materialen.

Tabel 1: overzicht normen met mogelijke toepassing binnen dit onderzoek

De groen gekleurde normen zijn mogelijk interessant voor verder gebruik bij de ontwikkeling van de testopstelling die volgt uit dit onderzoek. Zo zijn de normen NEN-EN-ISO 7726, NEN-EN-ISO 7730 en NEN-EN-ISO 15927 bedoeld om het interne en externe klimaat nader te bepalen, waar volgens een simulatieprogramma op gemaakt kan worden. NEN-EN-ISO 13788 beschrijft de Glaser methode die in dit onderzoek alleen van toepassing is bij de vochtbepaling in de extreme simulatie (zie deelonderzoek; dampdiffusie open bouwen). NEN-EN-ISO 9346 geeft meer informatie over benodigde grootheden, termen, definities en symbolen die van toepassing zijn bij vochttransport.

Het merendeel van de geel gekleurde normen hebben betrekking tot het bepalen van de waterdampdoorlatendheid van een bepaald materiaal en zijn vooral de normen bedoeld om de dampdiffusieweerstand (μ -waarde) van dat desbetreffende materiaal te bepalen. De testopstelling voor het bepalen van deze μ -waarde verschilt met de testopstelling die volgt uit dit onderzoek. De test voor het bepalen van de μ -waarde dient daarom ook apart uitgevoerd te worden. Deelonderzoek; thermohygrische eigenschappen omschrijft hoe dampdiffusie werkt en geeft aan dan de μ -waarde uitsluitend bepaald kan worden voor homogene materialen.

Zoals eerder genoemd zijn er normen met betrekking tot het bepalen van de dampdiffusieweerstand en vochtoverdracht. Echter zijn er geen normen die dampdiffusie open bouwen specifiek behandelen, omdat dit een nog wat onbekend begrip is. Dhr. H. Nieman (2017), voorzitter 'norm(sub)commissie vocht' bij het Koninklijke Nederlandse Normalisatie-instituut, zegt dat de testopstelling uit dit onderzoek hem ook onbekend is. Het is daarom aanbevolen om in gesprek te gaan met dhr. H. Nieman of een gelijkwaardige deskundig persoon om meer duidelijkheid te krijgen over welke normen van toepassing zijn.

2.1.1 Beker en box methode

De μ -waarde van een materiaal en wordt voor bouwmaterialen gemeten door middel van de beker methode (NEN-EN-ISO 12572, 2016) en is vergelijkbaar met de norm die gebruikt wordt in de Verenigde Staten; ASTM E96. Deze beker methode wordt uitsluitend gebruikt voor homogene bouwmaterialen en is niet toepasbaar voor samengestelde gevelconstructies. Deze methode is geschikt voor zowel hygroscopische als niet-hygroscopische materialen. In de annexen van NEN-EN-ISO 12572 worden verschillende mogelijke methoden omschreven, elke specifiek voor een materiaalsoort. Tevens kan de dampdiffusie bepaald door de box methode (NEN-ISO 21129, 2007). Deze methode is hoofdzakelijk bedoeld voor het bepalen van de dampdiffusie van materialen met een lage dampdiffusieweerstand ('dampopen'). De NEN-ISO 21129: 2007 beweert dat materialen met een lage waterdampdiffusieweerstand geen hogere Z_n -waarde hebben dan; $1,8 \times 10^9 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa} / \text{kg}$. Deelonderzoek; thermohygrische eigenschappen beschrijft waar de Z_n -waarde vandaan komt. Net als bij de beker methode kan de box methode zowel gebruikt voor hygroscopische als niet-hygroscopische materialen. Deze meetmethodes zijn bedoeld voor statische metingen voor enkel-laags materialen of producten. In deze methodes worden zoutoplossingen gebruikt om de juiste relatieve vochtigheid te simuleren. Het verschil in zoutoplossing zal zorgen voor verschillende relatieve vochtigheden dat ook wel het kritische vochtgehalte wordt genoemd. Het Data Cultureel Erfgoed citeert: "Het kritisch vochtgehalte is de minimale relatieve vochtigheid die nodig is voor het vervloeien van een bepaald zout. Zodoende is het ook de laagste relatieve vochtigheid waarbij dat zout de corrosie van een metaal kan bewerkstelligen. Het is ook de laagste relatieve vochtigheid waarbij een zout in staat is door poreus materiaal te migreren". Het kritische vochtgehalte is vochtigheid waarboven een materiaal vocht absorbeert uit de omgeving en eronder vochtigheid toevoegt aan de omgeving (Clayton, 1984). De zoutoplossing zal, indien de relatieve vochtigheid hoger is dan het kritische vochtgehalte, vocht onttrekken uit de omgeving totdat het verzadigd is. In een afgesloten ruimte zal de relatieve vochtigheid op dit punt constant blijven omdat indien de relatieve vochtigheid onder het kritische vochtgehalte komt, deze zoutoplossing vocht toevoegt aan de omgeving.

In de beker en box methode wordt geen invloed uitgeoefend op de temperatuur. Door de temperatuur, relatieve vochtigheid en massa van zoutoplossing te meten kan de dampdiffusieweerstand worden berekend. Overigens zijn er twee principes waarmee de dampdoorlaatbaarheid gemeten kan worden; natte en droge beker methode.

Natte beker methode: Het principe van de natte beker methode is dat er water (zoutoplossing) in de beker wordt gedaan, waar vervolgens het monster op wordt geplaatst. Deze beker plus monster worden dan afgesloten door middel van bijvoorbeeld een ring. Het gaat hierom dat de randaansluiting van het monster en de beker volledige afgesloten zijn. De beker wordt in zijn geheel in een geklimatiseerde ruimte geplaatst. De zoutoplossing in de beker creëert een relatieve vochtigheid en samen met de juiste temperatuur zal er een bepaalde dampspanning ontstaan. De damp zal zich vervolgens door het monster verplaatsen. Na het meten van de massa van de zoutoplossing kan bepaald worden hoeveel damp zich door het monster verplaatst heeft bij een bepaalde tijd.

Droge beker methode: Het principe van de droge beker methode is vrijwel hetzelfde als de natte beker methode, echter zit het verschil hem in de damptransport richting. In deze methode wordt er geen zoutoplossing in de beker gedaan, maar wordt deze geregeld in de geklimatiseerde ruimte waarin de beker zich bevindt. In deze methode verplaatst de damp zich van de geklimatiseerde ruimte, door het monster, naar de binnenruimte van de beker.

2.1.2. Lage dampdiffusie weerstand

NEN-EN-ISO 12572, §6.5 beweert dat monsters met een lage dampdiffusieweerstand een $S_d < 0,1$ m bevatten. Dit verschilt met de waarde van 0,5m die door N. Prinsen (2015) wordt gegeven in het document 'dampopen bouwen doe je zo'. NEN-EN-ISO 12572 beweert tevens dat gedistilleerd water gebruikt moet worden om correct te kunnen testen. Gedistilleerd water zorgt voor een constante 100% relatieve luchtvochtigheid in de beker methode. De hoge snelheid van het damptransport voorkomt dat er condensatie ontstaat aan de onderzijde van het monster, wat bij monsters met een hoge dampdiffusieweerstand wel een risico is. Bij overige monsters in de beker methode worden zoutoplossingen gebruikt die een bepaalde relatieve vochtigheid geven zoals eerder omschreven in [paragraaf 2.1.1](#). In de testopstelling, als gevolg van dit onderzoek, dienen verschillende relatieve vochtigheden te worden gecreëerd. Het gebruik van gedistilleerd water is hierbij niet direct van belang, omdat het geen constante relatieve vochtigheid betreft. De bevochtigings- en ontvochtigingsapparatuur van de testopstelling dient ervoor te zorgen dat de juiste relatieve vochtigheid aanwezig is in de klimaatruimtes. Zoutoplossing hebben ook geen directe voordelen voor de benodigde relatieve vochtigheden. Wel kunnen zoutoplossingen een nadelige werking hebben in verband met corrosie van de testopstelling. Dit wordt nader omschreven in deelrapport; opbouw testopstelling. Tevens is het alleen mogelijk de dampdiffusieweerstand te bepalen van 'dampopen' materialen met behulp van natte beker methode.

2.1.3. Damdoorlatendheid thermische isolatie

Voor het toetsen van de dampdoorlatendheid van thermische isolatie wordt de NEN-EN 12086:2013 gebruikt. Deze norm beschrijft de benodigde uitrusting en methoden. Het is hierbij ook van belang dat het gaat om homogene materialen. De testmethode wordt normaal niet gebruikt om de dampdoorlatendheid te bepalen van aparte enkellaags damp barrières, waaronder membranen en folies. Voor producten met een dampdiffusieweerstand (S_d -waarde) van ≥ 1.000 m zijn andere testmethoden aanwezig. Tabel 1 geeft meerdere normen weer met bijhorende meetmethodes voor allerlei soorten materialen zoals; cellenbeton, verharde pleister mortels, bitumen, kunststof, rubberen banen, verven en vernissen.

2.1.4. "Hot Box" normen

Naar aanleiding van deelrapport; opbouw testopstelling is geconcludeerd dat de Hot Box methode geschikt is als basis in het kader van dit onderzoek. De norm; ASTM C1363 Standaard wordt gebruikt om deze testopstelling te realiseren. Er is nader onderzoek gedaan naar Nederlandse normen die dezelfde methode omschrijft. Deze normen zijn weergegeven in Tabel 2. De NEN-EN 1934:1998 is het meest geschikt bij het realiseren van de warmtekast. Deze richt zich op metselwerk. Echter richten de overige normen zich specifiek op testmonsters die onder andere thermische isolatie, ramen, deuren en luiken bevatten.

NEN-EN	1934	:1998 en	Thermische prestaties van gebouwen - Bepaling van de warmteweerstand met de 'hotbox'-methode met gebruik van een warmtestroommeter - Metselwerk
NEN-EN-ISO	8990	:1997 en	Thermische isolatie - Bepaling van de stationaire warmtegeleidingseigenschappen - Methode met de gekalibreerde en afgeschermd warmtekast
NEN-EN	12412-2	:2003 en	Thermische eigenschappen van ramen, deuren en luiken - Bepaling van de warmtedoorgangscoefficiënt met de warmtekastmethode (hot box) - Deel 2: Kozijnen
NEN-EN	12412-4	:2003 en	Thermische eigenschappen van ramen, deuren en luiken - Bepaling van de warmtedoorgangscoefficiënt met de warmtekastmethode (hot box) - Deel 4: Behuizing van rolluiken
NEN-EN-ISO	12567	:2010/C1:2010 en;de;fr	Thermische eigenschappen van ramen en deuren - Bepaling van de warmtegeleiding met de warmtekastmethode - Deel 1: Volledige ramen en deuren

Tabel 2: normen met betrekking tot Hot Hox (warmtekast) methode

3. Conclusie

Het Nederlandse bouwbesluit (2011) geeft geen wet- & regelgeving die eisen stelt aan dampdiffusie open bouwen of het testen van dampdiffusie open gevelconstructies. Wel is er overige wet- en regelgeving die invloed hebben bij het samenstellen van een gevel. Hier dient dan ook te allen tijde rekening mee gehouden te worden.

Er zijn geen normen die dampdiffusie open bouwen behandelen. Wel zijn er normen die de bepaling van de dampdiffusieweerstandsgetal (μ -waarde) beschrijven. Deze normen betreffen het bepalen van de 'waterdampdoorlatendheid' van een materiaal. Er zijn meerdere normen waarmee de μ -waarde van een specifiek materiaal bepaald kan worden. NEN-EN-ISO 12572 en NEN-ISO 21129 zijn specifiek bedoeld om de dampdiffusieweerstandsgetal van bouwmaterialen te bepalen. Het principe bij het bepalen van de μ -waarde is in elke norm hetzelfde. Deze gaat uit van de 'natte beker methode', waarbij er een ruimte (beker) wordt gemaakt waar vloeistof (zoutoplossing) in gaat. De ruimte wordt afgedekt met het testmonster die vervolgens volledig wordt afgesloten. Deze afsluiting kan op verschillende manieren worden uitgevoerd en is afhankelijk van de grootte van het materiaal. Dit onderzoek betreft het ontwikkelen van een testopstelling voor het testen van dampdiffusie open gevelconstructies, waarbij materialen worden toegepast met een lage dampdiffusieweerstand. NEN-ISO 21129 (box methode) geeft aan dat deze norm geschikt is voor het bepalen van de dampdiffusieweerstandsgetal (μ -waarde) van materialen met een lage dampdiffusieweerstand. Deelonderzoek; thermohygrische eigenschappen beschrijft wat dampdiffusie inhoudt en hoe dit werkt.

Er zijn meerdere methoden (normen) om de μ -waarde te bepalen. Dit is afhankelijk van het materiaal dat getest dient te worden, echter omschrijven de NEN-EN-ISO 12572 en NEN-ISO 21129 meerdere methoden voor verschillende materialen. De dampdiffusieweerstand kan echter niet voor een samengestelde gevelconstructie gemeten worden, maar dient gemeten te worden voor een homogeen materiaal of product met parallelle lagen zoals bijvoorbeeld gipsplaten.

Het dampdiffusieweerstandsgetal (μ -waarde) kan worden bepaald volgens de volgende normen en is afhankelijk van het te testen materiaal:

NEN-EN	772-15	:2000 en	Beproevingmethoden voor metselstenen - Deel 15: Bepaling van de waterdampdoorlatendheid van cellenbeton
NEN-EN	1015-19	:1998/A1:2014 en	Beproevingmethoden voor mortel voor metselwerk - Deel 19: Bepaling van waterdampdoorlatendheid van verharde pleistermortels
NEN-EN	1931	:2000 en	Flexibele banen voor waterafdichtingen - Bitumen, kunststof en rubber banen voor waterafdichtingen voor daken - Bepaling van de eigenschappen van waterdampdoorlatendheid
NEN-ISO	2528	:1996 en	Materialen in vellen - Bepaling van de waterdampdoorlatendheid - Gravimetrische (schotel) methode
NEN-EN-ISO	7783	:2011 en	Verven en vernissen - Bepaling van eigenschappen van waterdampdoorlatendheid - Kroesmethode
NEN-EN	12086	:2013 en	Materialen voor de thermische isolatie van gebouwen - Bepaling van de waterdamp-doorlatendheidseigenschappen.
NEN-EN-ISO	12572	:2016 en	Vochteigenschappen van bouwmaterialen en -producten - Bepaling van de waterdampdoorlatendheid - Bekermethode
NEN-ISO	21129	:2007 en	Hygrothermische prestatie van bouwmaterialen en producten - Bepaling van de waterdoorlatendheid - Boxmethode.

Bij het testen van de dampdoorlatendheid bij dampopen materialen kan volgens NEN-EN-ISO 12572 beter gedistilleerd water worden gebruikt, omdat dit voor 100% relatieve vochtigheid. De hoge damptransport

zorgt ervoor dat condensatie wordt voorkomen, wat bij materialen met een hoge dampdiffusieweerstand wel een risico is. Echter wordt in de testopstelling gebruik gemaakt van gevarieerde relatieve vochtigheden en er is daarom geen voorkeur voor gedistilleerd water noch voor zoutoplossingen. Wel kunnen zoutoplossingen en nadelig effect hebben op de testopstelling in verband met corrosie. Dit is nader onderzocht in deelrapport; opbouw testopstelling.

De testmethoden gebruikt in de genoemde normen betreffen relatief kleine en stationaire meetopstellingen. De testopstelling in dit onderzoek betreft het onderzoeken van gevelconstructies waarbij het van belang is dat dit op relatief grote schaal uitgevoerd wordt om de juiste waarden te kunnen waarnemen. Hierbij is het cruciaal dat de sensoren juist geplaatst worden om de effecten van randwerking te vermijden. Dit wordt nader omschreven in deelrapport 4: meetmethodes & (meet)apparatuur.

Deelonderzoek: dampdiffusie open bouwen omschrijft hoe het klimaat voor de klimaatkamer simulaties bepaald kan worden. Indien er besloten is zelf metingen uit de voeren op locatie voor zowel het externe als interne klimaat kan gebruikt gemaakt worden van de volgende normen:

NEN-EN-ISO	7726	:2001 en	<i>Ergonomie van de thermische omgeving - Instrumenten voor het meten van fysische grootheden</i>
NEN-EN-ISO	7730	:2005	<i>Klimaatomstandigheden - Analytische bepaling en interpretatie van thermische behaaglijkheid door berekeningen van de PMV en PPD-waarden en lokale thermische behaaglijkheid</i>
NEN-EN-ISO	15927	Deel 1	<i>Hygro-thermische eigenschappen van gebouwen - Berekening en weergave van klimatologische gegevens.</i>

Het bepalen van de inwendige condensatie in een statische situatie kan NEN-EN-ISO 13788:2013 worden aangehouden. Deze norm omschrijft de Glaser methode en is in dit onderzoek uitsluitend geschikt voor de extreme simulatie die is omschreven in deelonderzoek; dampdiffusie open bouwen.

4. Literatuurlijst

Clayton, W. (1984). Humidity Factors Affecting Storage and Handling of Fertilizers. Muscle Shoals, Verenigde Staten van America.

Data Cultureel Erfgoed. (sd). *Kritisch vochtgehalte*. Opgehaald van Data Cultureel Erfgoed:
<http://data.cultureelerfgoed.nl/nl/item?uri=http://data.cultureelerfgoed.nl/semnet/4586e5af-2120-4eca-9e1c-7ab4205fb346>

Donner, J. (2011, Augustus 11). Staatsblad der Koninkrijk der Nederlanden 416: Besluit van 29 augustus 2011 houdende vaststelling van voorschriften met betrekking tot het bouwen, gebruiken en slopen van bouwwerken (Bouwbesluit 2012). Nederland.

Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2007). *NEN-ISO 21129*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut.

Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut. (2016). *NEN-EN-ISO 12572*. Delft: Koninklijk Nederlands Normalisatie-instituut.

Nieman, H. (2017, Mei 3). Normen dampdiffusie open bouwen. (Y. Verhoeven, Interviewer)

Prinsen, N. (2015, Juli). Dampopen bouwen doe je zo. Delft, Zuid Holland, Nederland: SBRCURnet.

Bijlage IV



Meetmethodes en (meet)apparatuur

Welke meetmethodes en (meet)apparatuur worden in de praktijk gehandhaafd om thermohygrische eigenschappen te testen met betrekking tot dampdiffusie open gevelconstructies?

Deelonderzoek
Versie 3

Auteur: Y. Verhoeven
Studentnummer: 66801
Opleiding: Bouwkunde Voltijd

HZ University of Applied Sciences
1^e begeleider: I. Weegels
2^e begeleider: B. Vercouteren

Centre of Expertise Biobased Economy,
lectoraat biobased bouwen
Stagebegeleider: W. Böttger

Inhoud

1.	INLEIDING	1
2.	VERGELIJBARE MEETMETHODES	1
3.	APPARATUUR	3
3.1.	MEETAPPARATUUR.....	3
3.2.	THERMO SENSOREN.....	4
3.3.	HYGROSENSOREN.....	5
3.3.1.	<i>Capacitieve sensoren</i>	6
3.3.2.	<i>Resistieve sensoren</i>	7
3.3.3.	<i>Verwerking van hygrosensoren in testmonster</i>	7
3.3.4.	<i>Randeffecten</i>	9
3.4.	VERWARMINGS- EN KOELINGSINSTALLATIE	9
3.5.	BEVOCHTIGINGS- EN ONTVOCHTIGINGSINSTALLATIE.....	11
3.6.	APPARATUUR AANSLUITING	12
4.	'HET MOLLIERDIAGRAM IN PRAKTIJK'	13
4.1.	VERWARMEN	13
4.2.	BEVOCHTIGEN MET WATER OF STOOM	13
4.3.	VERWARMEN EN TEGELIJK BEVOCHTIGEN.....	13
4.4.	ONTVOCHTIGING	14
5.	PARAMETERS	16
6.	CONCLUSIE	17
	BIBLIOGRAFIE.....	20

1. Inleiding

In verband met gebrek aan deskundigheid en kennis is besloten de apparatuur niet volledig uit te werken. Wel zijn de principes beschreven die aangehouden dienen te worden in de desbetreffende testopstelling. Dit deelonderzoek richt zich op apparatuur die de juiste klimaatsimulaties in de klimaatkamers kunnen simuleren, sensoren die de klimaatsimulaties en vochtgedrag in de testmonster kunnen waarnemen & en het principe van hoe deze gekoppeld dienen te worden.

2. Vergelijkbare meetmethodes

NEN-EN-ISO 12572 (bekermethode) & NEN-ISO 21129 (boxmethode) beschrijven beide een manier waarop de dampdiffusieweerstand bepaald kan worden (zie deelonderzoek; wet- & regelgeving). In deze methoden worden een constante temperatuur en relatieve vochtigheid aangehouden. In tegenstelling tot deze normen is damptransport bij dampdiffusie open bouwen een dynamisch proces waarbij er een verandering is in temperatuur en relatieve luchtvochtigheid (zie deelonderzoek; dampdiffusie open bouwen).

Paragraaf 3.3. omschrijft welke vochtsensoren beschikbaar zijn om tussen de lagen van de gevelopbouw te plaatsen en zo het vocht in de gevel te meten tijdens het verloop van de test. Volgens Derome, Fazio, Anthientis, & Rao is het mogelijk hygrosensoren te plaatsen in het testmonster, echter is het nog wel discutabel of de metingen betrouwbaar zijn. In dit deelonderzoek is daarom vooral rekening gehouden met de praktische toepassing. Dat wil zeggen dat er gekeken is of de sensoren zodanig van vorm en formaat zijn dat deze tussen de lagen van de gevel geplaatst kunnen worden zonder cruciale problemen te veroorzaken.

Tevens is het van belang om te weten wat de vochtigheid is in houtconstructies. Vochtpercentage hoger dan 21% zijn risicovol voor houtproducten, waarbij houtrot kan optreden. Ook het vochtgehalte in de bouwmaterialen dienen gemonitord te worden om te kunnen bepalen of de samengestelde gevelconstructie daadwerkelijk dampdiffusie open is. Er zijn wel houtvochtmeters, echter zijn deze voornamelijk in handformaat en is het onbekend of deze ook in een praktische toepassing beschikbaar zijn voor deze testopstelling. Hier dient een deskundige nader onderzoek naar te doen om te kunnen bepalen of deze mogelijkheid geschikt is voor deze testopstelling. Indien het niet mogelijk is om vochtsensoren in de testmonster (gevel) toe te passen zijn er andere testmogelijkheden die zijn weergegeven in Tabel 1.

Methode	Kenmerken
o Darr-methode	Dit is de oudste methode voor het bepalen van het vochtgehalte. 'Darr' is afkomstig uit het woord 'darren' wat drogen betekent. Hierbij wordt er een testmonster gedroogd in een oven bij een temperatuur van 105°C. Door deze temperatuur verdampt het vocht uit het monster. Het gewicht van het monster wordt voor- en achteraf gemeten om zo de hoeveelheid waterdamp te meten die uit het monster is verdampt. Een voordeel is dat met het genomen monster naderhand nog verdere testen uitgevoerd kunnen worden. Echter een nadeel bij deze methode is dat deze in de praktijk niet op locatie uit gevoerd kan worden indien er zich vochtproblemen in een bouwwerk voordoet (Dinant).
o Infrarood (IR) droogtechniek	Deze methode heeft een vergelijkbare werking met dat van de Darr-methode. Hierbij worden monsters genomen die op gewicht worden

gemeten. Vervolgens worden de monsters gedroogd door middel van een infrarood lamp die het vocht verwarmt tot deze verdampt. Door het gewicht voor- en achteraf te meten kan bepaald worden hoeveel vocht er is verdampt (Dinant).

o Diëlektriciteitsmeting	Deze methode wordt vooral als meting vooraf gebruikt om oppervlakkig de vochtverdeling in de muur vast te stellen. Deze methode kan met de juiste ervaring handig zijn om de oorzaak van een vochtprobleem te vinden. Deze methode is geschikt om op locatie uit te voeren echter is deze minder nauwkeurig omdat het geen onderscheid maakt tussen een vochtige stuc laag en vochtige steenmuur. Paragraaf 3.3.1 zegt meer over capacitieve sensoren die een diëlektrisch principe gebruiken (Dinant). Een dilectrische vochtmeting kan schadevrij worden uitgevoerd, wat inhoudt dat er geen monster hoeft te worden genomen (Bekker, CM-meting, 2010).
o Elektrische weerstandsmeting	Paragraaf 3.3.2 omschrijft hoe resistieve sensoren werken. Dit is dezelfde werking en maakt ook gebruik van een elektrische weerstandsmeting. Door de eerste elektrode wordt een stroom gestuurd, het materiaal in. Deze stroom wordt door de tweede elektrode opgevangen en uit het verschil in stroomsterkte kan bepaald worden hoeveel vocht aanwezig is. Echter spelen zouten een grote rol bij het beïnvloeden van deze waarde en daardoor kan een vertekend beeld ontstaan (Dinant). Deze methode is goed geschikt voor houtmaterialen vanwege de homogeniteit van hout in tegenstelling tot minerale materialen (Bekker, Vocht meten in hout, 2010). Een elektrische weerstandsmeting kan schadevrij worden uitgevoerd, wat inhoudt dat er geen monster hoeft te worden genomen.
o CM-meting	In een CM-meting wordt een monster genomen van 20gr, 50gr of 200gr. Dit monster wordt vergruisd en in een reactor ingebracht samen met vier stalen kogels en een calciumcarbit-ampul. Na het sluiten van de reactor wordt deze geschud om de ampul te breken en eventueel meer van het monster te vergruizen. De stof uit de ampul reageert met het in het monster aanwezig water dat zorgt voor een drukverhoging. Hieruit kan berekend worden wat het vochtgehalte is in het genomen monster. De CM-meting geeft een percentage. Deze is echter wel hoger dan de waarde afkomstig uit de Darr-methode. <i>"De verkregen CM-waarden kunnen met tabellen vergeleken worden in relatie tot het soort vloer (cement, magnesium, calciumsulfaat), danwel of de vloer verwarmd wordt."</i> - (Bekker, 2010). Deze methode is geschikt voor het meten van het vochtgehalte in een verwerkte cementgebonden bouw materiaal, echter kan beton niet gemeten worden met de CM-meting (Renotec Duo).

Tabel 1: meetmethodes voor het meten van het vochtgehalte van een materiaal, bron data;

Bij het nemen van monster dient rekening gehouden te worden dat er warmteontwikkeling optreedt bij het nemen van het monster (Bekker, 2010). Monsters worden veelal genomen door te hakken of de boren. Bij hakken treedt er nagenoeg geen warmte op en heeft dit geen invloed op het monster. Bij boren echter wel en daarbij dient er kritisch gekeken te worden naar het toerental van de boormachine en de diameter van de boor. *"Temperatuursverhoging ten gevolge van het boren mag niet meer zijn dan 15 °C. Dit is praktisch te*

controleren of de boorkop niet warmer wordt dan handwarm (35 – 40 °C); Toerental van de slagboormachine lager dan 300 omwentelingen per minuut; Boordiameter groter dan 20 mm." - (Athene Noctua, 2016).

Het feit de Darr-methode niet op locatie uitgevoerd kan worden is niet van toepassing dit onderzoek. De Darr-methode kan na het uitvoeren van een test op een dampdiffusie open gevelconstructie worden uitgevoerd. Het voordeel dat de IR-methode op locatie uitgevoerd kan worden is in dit onderzoek niet van toepassing omdat het een vaste locatie betreft. De CM-meting wordt alleen gebruikt voor cement gebonden ondergronden en komt niet van toepassing in dit onderzoek. De diëlektriciteitsmeting en elektrische weerstandsmeting zijn beide geschikt om het vochtgehalte te meten in een materiaal. Alleen zijn deze elektrische meetmethoden minder nauwkeurig dan de Darr-methode. Hieruit kan geconcludeerd worden dat gezien de omstandigheden de Darr-methode het meest geschikt zou zijn om naderhand vochtmetingen uit te voeren om het vochtgehalte in bouwmaterialen te bepalen.

Het is mogelijk dat er meer informatie te vinden is in de Duitse normen die geleverd worden door het Deutsches Institut für Normung (DIN). Voor het meten van vocht kan gekeken worden in de DIN 4074, DIN 68365 en DIN 1052-1 (Bekker, Vocht meten in hout, 2010). Vanwege gebrek aan Duitse taalkennis en tijd binnen dit onderzoek worden deze normen niet nader onderzocht.

3. Apparatuur

De testopstelling dient zodanig ontworpen te worden dat de verschillende binnen en buiten klimaten gesimuleerd kunnen worden. Om deze simulaties mogelijk te maken dient er apparatuur aangesloten te worden die de capaciteit heeft om temperaturen en relatieve vochtigheden te bereiken benodigd zijn. In overleg met de opdrachtgever is besloten dat er een Nederlands klimaat aangehouden wenst te worden met een lichte overcapaciteit. Dit leidt naar apparatuur dat in staat temperaturen te bereiken van -15°C tot 40°C en relatieve vochtigheden van 10% tot 95%. Of de apparatuur in staat dient te zijn om relatieve vochtigheden te behalen van 10% is afhankelijk van de kosten van de benodigde temperatuur. Tevens kan deze eis veranderd worden indien de kosten onnodig hoog zijn. In dit hoofdstuk wordt onderzocht welke mogelijkheden er zijn voor apparatuur om de temperatuur en relatieve vochtigheid te regelen binnen de klimaatkamers. In verband met tijd wordt niet nader onderzocht wat de goedkoopste optie is met voldoende capaciteit. Flexibiliteit wordt meegenomen in deze toepassing, omdat de locatie niet is vastgesteld.

3.1. Meetapparatuur

Op verschillende locaties binnen de testopstelling dienen de temperatuur en relatieve vochtigheden gemeten te worden om deze te kunnen veranderen of bij te stellen indien nodig. De klimaatkamers en de gevel (testmonster) worden beide gemonitord. Volgens D. Remans (2017), Laboratorium manager TNO, dient de temperatuur gemeten te worden bij zowel de in- als uitvoer van de klimaatkamers, als er verwarmd wordt door middel van lucht. Ook zegt D. Remans dat er geen of weinig verse lucht wordt toegevoegd maar dat lucht vaak wordt rondgecirculeerd. P. Best (2017), project manager R&B Scheldebouw, vermeldt dat de lucht in de klimaatkamers bij Scheldebouw ook wordt gecirculeerd. Dit is een methode om ruimtes sneller te kunnen verwarmen, omdat de verwarmde lucht in de kamer wordt afgezogen om vervolgens verder te verwarmen en weer in de kamer te blazen. Het is hierbij belangrijk dat de lucht boven in de ruimte wordt afgezogen en onderin wordt ingeblazen. Om de temperatuur en relatieve vochtigheid te meten dienen bijhorende sensoren geplaatst te worden op de locaties weergegeven in Tabel 2. Tevens kan voor het meten van de temperatuur naar een thermokoppel (thermosensor) worden gezocht (Best, 2017). Sensoren zijn er overigens in vele vormen en maten. De aanschaf is afhankelijk van het budget die hiervoor beschikbaar is.

	Klimaatkamer 'binnen'		Klimaatkamer 'buiten'		Gevel (monster) Tussen lagen	Gevel in 'dikke' lagen (indien mogelijk)	Sensor
	invoer	uitvoer	invoer	uitvoer			
Temperatuur [°C]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Thermo-sensor
Relatieve vochtigheid [%]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Hygro-sensor

Tabel 2: locatie sensoren

3.2. Thermo sensoren

Thermosensoren dienen alleen geplaatst te worden bij de in- en uitvoer van de luchtregeling in beide klimaatkamers. Er bestaan verschillende soorten thermosensoren en voor dit onderzoek is het belangrijk dat deze voldoen aan het bereik van -15°C tot en met 40°C. Ook is het gunstig dat er een thermosensor geplaatst wordt in de testmonster (gevel) die een digitale output heeft, zodat deze een signaal kan doorgeven aan de datalogger of computer. Op deze manier kan tevens de warmteoverdracht bepaald worden. [Paragraaf 3.3](#) gaat nader in op vochtsensoren. De relatieve vochtigheid dient bij en in- en uitvoer van de luchtregeling in de klimaatkamers ook gemeten te worden. De vochtsensoren zijn vaak gecombineerd met thermosensoren tot één sensor. Hierbij is dan ook aanbevolen om deze sensoren te koppelen. Thermosensoren kunnen in twee categorieën worden verdeeld:

Contact temperatuur sensor typen	Bij deze typen is het vereist dat de sensoren fysiek contact maken met het te meten object. Zij kunnen vaste stoffen, vloeistoffen en gassen meten.
Non-contact temperatuur sensor typen	Deze typen gebruiken convectie en radiatie om de temperatuur te waarnemen. Zij kunnen vloeistoffen en gassen meten die radiatie uitstoten als de temperatuur veranderd.

Deze twee basistypen kunnen onderverdeeld worden in de volgende 3 groepen sensoren;

- Elektro-mechanisch
- Resistief (d.m.v. weerstand)
- Elektronisch

Binnen deze groepen bestaan verschillende principes voor thermosensoren zoals:

- Thermostaat
- Bimetaal thermostaat
- Thermo weerstand
- RTD (Resistive Temperature Detectors)
- Thermokoppel

(Electronic Tutorials)

Volgens P. Best (2017) kunnen thermokoppels ook gemakkelijk zelf gemaakt worden door thermokoppeldraad aan te schaffen en deze op juiste wijze te verwerken tot een thermokoppel. Er zijn overigens vele typen thermokoppels. In Figuur 1 geeft een overzicht weer van de verschillende typen thermokoppels. Uit dit overzicht blijkt dat thermokoppel 'type T' voldoet aan de eis voor het temperatuurbereik, gesteld in dit onderzoek. De eis voor het temperatuurbereik is -15°C tot en met $+40^{\circ}\text{C}$. Meerdere typen voldoen, maar thermokoppel 'type T' zit het meest dichtbij de minimale eis. Voor dit onderzoek zijn er meerdere soorten thermosensoren die geschikt zijn. Vanwege gebrek aan deskundigheid en tijd kan er geen thermosensor worden aanbevolen. Het is daarom aanbevolen om een deskundige nader onderzoek te laten doen naar een geschikte thermosensor. Wel kan worden geconcludeerd dat er voldoende mogelijkheden aan thermosensoren zijn die voldoen aan de randvoorwaarden in dit onderzoek.

ANSI/ASTM	$^{\circ}\text{C}$		
	Temperature Range	Standard	Special
T	-200° to -67°	$\pm 1.5\% \text{ T}$	$\pm 0.8\% \text{ T}^*$
	-67° to -62°	$\pm 1^{\circ}$	$\pm 0.8\% \text{ T}^*$
	-62° to 125°	$\pm 1^{\circ}$	$\pm 0.5^{\circ}$
	125° to 133°	$\pm 1^{\circ}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
	133° to 370°	$\pm 0.75\% \text{ T}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
J	0° to 275°	$\pm 2.2^{\circ}$	$\pm 1.1^{\circ}$
	275° to 293°	$\pm 2.2^{\circ}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
	293° to 760°	$\pm 0.75\% \text{ T}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
E	-200° to -170°	$\pm 1\% \text{ T}$	$\pm 1^{\circ}$
	-170° to 250°	$\pm 1.7^{\circ}$	$\pm 1^{\circ}$
	250° to 340°	$\pm 1.7^{\circ}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
	340° to 870°	$\pm 0.5\% \text{ T}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
K	-200° to -110°	$\pm 2\% \text{ T}$	—
	-110° to 0°	$\pm 2.2^{\circ}$	—
	0° to 275°	$\pm 2.2^{\circ}$	$\pm 1.1^{\circ}$
	275° to 293°	$\pm 2.2^{\circ}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
N	293° to 1260°	$\pm 0.75\% \text{ T}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
	0° to 275°	$\pm 2.2^{\circ}$	$\pm 1.1^{\circ}$
	275° to 293°	$\pm 2.2^{\circ}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
R or S	293° to 1250°	$\pm 0.75\% \text{ T}$	$\pm 0.4\% \text{ T}$
	0° to 1260°	$\pm 1.5^{\circ}$	$\pm 0.6^{\circ}$
B	1260° to 1480°	$\pm 0.25\% \text{ T}$	$\pm 0.1\% \text{ T}$
	870° to 1700°	$\pm 0.5\% \text{ T}$	$\pm 0.25\%$
C^{xx}	0° to 426°	$\pm 4.4^{\circ}$	—
	426° to 2315°	$\pm 1\% \text{ T}$	—

Figuur 1: overzicht typen thermokoppels

3.3. Hygrosensoren

Volgens P. Jain (2012) bestaan er twee type vochtigheid sensoren; relatieve vochtigheid sensoren en absolute vochtigheid sensoren. De meeste absolute vochtigheid sensoren zijn tevens relatieve vochtigheid sensoren, maar kunnen op verschillende principes waarnemen (zie Tabel 3). Er wordt in deze paragraaf specifiek ingegaan op de vochtsensoren die tussen de gevelconstructielagen geplaatst kunnen worden zoals eerder is omschreven in [hoofdstuk 2](#).

Active Material	Thermo-set Polymer	Thermoplastic Polymer	Thermoplastic Polymer	Bulk Thermoplastic	Bulk AlO ₃	Lithium Chloride Film
Substrate	Ceramic or Silicon	Ceramic or silicon	Polyester or mylar film	N/A	N/A	Ceramic
Sensed Parameter	Capacitance	Capacitance	Capacitance	Resistance	Resistance	Conductivity
Measured Parameter	%RH	%RH	%RH	%RH	%RH	%RH
RH Change	0% to 100%	0% to 100%	0% to 100%	20% to 100%	2% to 90%	15% to <100%
RH Accuracy	$\pm 1\%$ to $\pm 5\%$	$\pm 3\%$ to $\pm 5\%$	$\pm 3\%$ to $\pm 5\%$	$\pm 3\%$ to $\pm 10\%$	$\pm 1\%$ to $\pm 5\%$	$\pm 5\%$
Interchangability	$\pm 2\%$ to $\pm 10\% \text{ RH}$	$\pm 3\%$ to $\pm 20\% \text{ RH}$	$\pm 3\%$ to $\pm 20\% \text{ RH}$	$\pm 5\%$ to $\pm 25\% \text{ RH}$	poor	$\pm 3\%$ to $\pm 10\% \text{ RH}$
Hysteresis	<1% to 3% RH	2% to 5% RH	2% to 5% RH	3% to 6% RH	<2% RH	very poor
Linearity	$\pm 1\% \text{ RH}$	$\pm 1\% \text{ RH}$	$\pm 2\% \text{ RH}$	poor	poor	Very poor
Risetime	15 s to 60 s	15 s to 90 s	15 s to 90 s	2 min to 5 min	3 min to 5 min	3 min to 5 min
Temperature Range	-40 $^{\circ}\text{C}$ to 185 $^{\circ}\text{C}$	-30 $^{\circ}\text{C}$ to 190 $^{\circ}\text{C}$	-25 $^{\circ}\text{C}$ to 100 $^{\circ}\text{C}$	10 $^{\circ}\text{C}$ to 40 $^{\circ}\text{C}$	-10 $^{\circ}\text{C}$ to 75 $^{\circ}\text{C}$	-
Long Term Stability	$\pm 1\% \text{ RH}/5 \text{ yr}$	$\pm 1\% \text{ RH}/\text{yr}$	$\pm 1\% \text{ RH}/\text{yr}$	$\pm 3\% \text{ RH}/\text{yr}$	$\pm 3\% \text{ RH}/\text{yr}$	>1% RH/ $^{\circ}\text{C}$

Tabel 3: parameters bij de verschillende typen absolute vochtigheid sensoren; bron data (Jain, 2012).

Uit Tabel 3 blijkt dat er een aantal soorten vochtigheidsmeters helemaal voldoen aan de randvoorwaarden uit dit onderzoek. Tevens is een vergelijking gemaakt tussen de verschillende meet principes en daarbij zijn

de relatief slechtere waarden uitgesloten. Er is hierbij geen eis vanuit het onderzoek, maar het betreft een testopstelling waarbij het van belang is dat de waarden zo nauwkeurig mogelijk gemeten worden. In Tabel 3 zijn de waarden die niet voldoen aan de randvoorwaarden, in dit onderzoek, rood gekleurd. De geel gekleurde waarden zijn waarden die relatief lager zijn dan die van de vergeleken sensoren en daarom minder geschikt zijn.

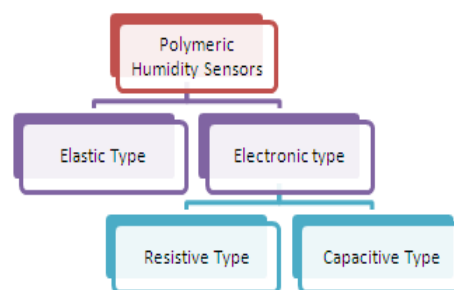
Uit Tabel 3 kan geconcludeerd worden dat resistieve en conductieve sensoren minder geschikt zijn voor deze testopstelling. Capacitieve sensoren bevatten wel de eigenschappen om nauwkeurige waarden te kunnen waarnemen. Het verschil in deze sensoren zit hem in het actieve materiaal en het substraat, waarbij de 'Thermo-set Polymeer' sensoren het meest nauwkeurig zijn.

Active Material	Thermo-set Polymer	Thermoplastic Polymer	Thermoplastic Polymer
Substrate	Ceramic or Silicon	Ceramic or silicon	Polyester or mylar film

Vochtigheid kan gemeten worden op de volgende manieren:

- Natte bol hygrometer
- Dauwpunt hygrometer
- Elektronische hygrometer

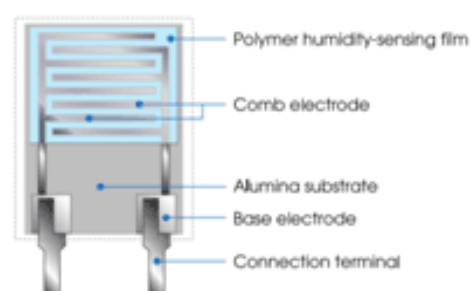
Natte bol en dauwpunt hygrometers worden veelal gebruikt in de meteorologie bij het meten van het buitenklimaat. Deze aspecten zijn nader omschreven in deelrapport; thermohygrische eigenschappen. Droge bol metingen worden aangenomen als droge lucht temperatuur die de gebruikelijke temperatuur weergeeft die wij normaliter aanhouden. Er is overigens een grote vraag naar elektrische hygrometers die ook wel vochtigheid sensoren worden genoemd. Vochtigheid sensoren kunnen volgens P. Jain ook weer in twee categorieën worden verdeeld (zie Figuur 2). Daarin is een onderscheid gemaakt tussen 'resistive' (resistieve) en 'capacitive' (capacitieve) typen. Paragrafen [3.3.1](#) en [3.3.2](#) omschrijven nader hoe deze zijn opgebouwd.



Figuur 2: Elektrische hygrometers, bron data; (Jain, 2012).

3.3.1. Capacitieve sensoren

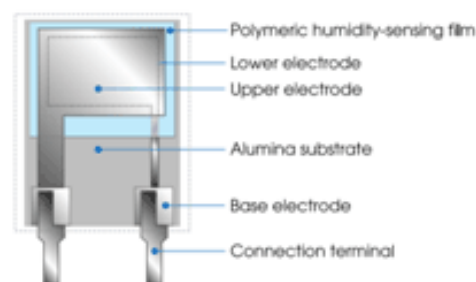
Sensoren gebaseerd op dit principe bevatten een hygroscopisch diëlektrisch (slecht geleidend) materiaal dat zich tussen twee elektroden bevindt en capacitor vormt. De meeste capacitieve sensoren maken gebruik van een plastic of polymeer als diëlektrische stof met een standaard waarde van 2 tot en met 15. Bij kamer temperatuur met een constante vochtigheid is deze waarde gemiddeld rond de 80. Zodra het materiaal damp absorbeert zal de waarde stijgen. Zoals eerder is genoemd in hoofdstuk 2, is dat zouten de geleiding beïnvloeden en daardoor de meting veranderen. Vanwege onbekende aanwezige zouten kunnen waarden daarom minder betrouwbaar zijn.



Figuur 3: Capacitieve sensoren (opbouw) bron data; (Jain, 2012)

3.3.2. Resistieve sensoren

Resistieve sensoren zijn gebaseerd op het waarnemen van verschillen in de weerstand zodra er verschil komt in de vochtigheid (zie Figuur 4). Er wordt een stroom via de eerste elektrode in het materiaal gestuurd die vervolgens weer uit het materiaal door elektrode 2 wordt opgevangen. Het apparaat meet het verschil in de stroomsterkte. Zoals eerder is genoemd in hoofdstuk 2, is dat zouten de geleiding beïnvloeden en daardoor de meting veranderen. Vanwege onbekende aanwezige zouten kunnen waarden daarom minder betrouwbaar zijn.



Figuur 4: resistieve sensoren (opbouw) bron data; (Jain, 2012).

3.3.3. Verwerking van hygrosensoren in testmonster

De vorm van beide sensoren zijn relatief plat. Deze vorm is gunstig indien zij tussen gevelelementen geplaatst dienen te worden in een gevelconstructie. De sensoren dienen gekoppeld te worden aan een datalogger/laptop, waar vervolgens door middel van software de gegevens kunnen worden vertaald naar grafieken en tabellen. Voor de sensoren in de klimaat kamer (niet in het testmonster) kunnen andere sensoren worden gebruikt omdat deze niet hoeven te voldoen aan de compacte uitvoering met betrekking tot volume. Er is een breed scala aan vochtigheid sensoren op de markt. Hieronder worden een aantal van deze weergegeven die momenteel op de markt zijn. De bedrijven die worden genoemd hebben vaak meerdere sensoren in hun assortiment. Echter worden in dit onderzoek sensoren weergegeven gebaseerd op nauwkeurigheid van de vochtigheid en temperatuur waarnemingen. Er is een keuze gemaakt om de meest nauwkeurige sensoren te weergeven, om een duidelijk beeld te creëren van de mogelijkheden.

Er kan geconcludeerd worden dat er hygrosensoren bestaan die de geschikte afmetingen hebben om toegepast te worden in het testmonster. Deze hygrosensoren voldoen in principe aan de eis voor het relatieve vochtigheidsbereik (10% tot en met 95%) dat gesteld is in dit onderzoek. Volgens het rapport 'Use of an environmental chamber to investigate large-scale envelope specimen hygrothermal performance' van Derome, Fazio, Anthientis, & Rao is het mogelijk hygrosensoren te plaatsen in het testmonster, echter is het nog discutabel of deze metingen betrouwbaar zijn.

Innovative Sensor Technology - Digital Humidity Sensor HYT 271 - (Figuur 5)

Size: 10.2 x 5.1 x 1.8 mm

Model: Humidity sensor with SIL-connections on ceramic substrate

Accuracy: Humidity $\pm 1.8\%$ rH, Temperature ± 0.2 °C

Measuring range: Humidity 0 ... 100% r.H. (max. dp = +80 °C), Temperature - 40 ... +125 °C

Dimensions: 5.08 x 10.16 x 1.8 mm

Connection: SIL RM 1.27 mm

Humidity resolution: 0.02% rH

Hysteresis: < $\pm 1\%$ rH

Linearity error: < $\pm 1\%$ rH

Response time t63: < 4 sec

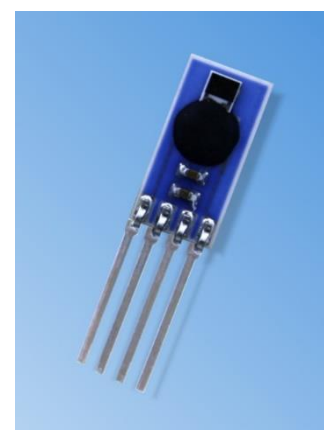
Temperature resolution: 0.015 °C

Digital interface: I²C, address 0x28 or alternative address

Operating voltage: 2.7 ... 5.5 V

Current consumption (Nom.): < 1µA in ready state < 22µA at 1Hz measuring rate
850 µA maximum

ST Multi Electronics - HTS221



Figuur 5: Digital Humidity Sensor HYT 271

Polymer dielectric planar capacitor
 0 to 100% relative humidity range
 Supply voltage: 1.7 to 3.6 V
 Low power consumption: 2 μ A @ 1 Hz ODR
 Selectable ODR from 1 Hz to 12.5 Hz
 High rH sensitivity: 0.004% rH/LSB
 Humidity accuracy: $\pm$ 3.5% rH, 20 to +80% rH
 Temperature range: -40 °C to 120 °C
 Temperature accuracy: $\pm$ 0.5 °C, 15 to +40 °C
 Embedded 16-bit ADC
 16-bit humidity and temperature output data
 SPI and I²C interfaces
 Factory calibrated
 Tiny 2 x 2 x 0.9 mm package
ECOPACK® compliant



Figuur 6: HTS221

Si7005 Digital Relative Humidity and Temperature Sensor - (Figuur 7)

Relative Humidity Sensor: $\pm$ 4.5% RH (maximum @ 20–80% RH)
 Temperature Sensor: $\pm$ 0.5 °C accuracy (typical) $\pm$ 1 °C accuracy (maximum @ 0 to 70 °C)
 0 to 100% RH operating range
 Up to -40 to +85 °C operating range
 Wide operating voltage range (2.1 to 3.6 V)
 Low Power Consumption: 240 μ A during RH conversion
 I2C host interface
 Integrated on-chip heater
 4 mm x 4 mm QFN package
 Excellent long term stability
 Factory calibrated
 Optional factory-installed filter/cover
 Low-profile
 Protection during reflow
 Excludes liquids and particulates (hydrophobic/oleophobic)



Figuur 7: Si7005

Honeywell Humidicon - HIH9121-021-001 - (Figuur 8)

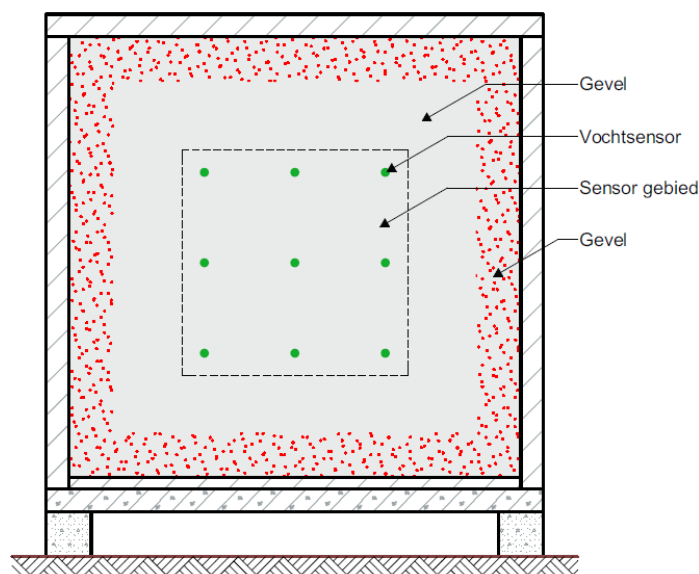
Combined Humidity and Temperature Sensor: Yes
 Operating Temperature: -40 °C to 125 °C [-40 °F to 257 °F]
 Hysteresis: $\pm$ 1.0 %RH
 Output Signal: Digital I2C
 Supply Current: 650 μ A
 Supply Voltage: 3.3 Vdc typ.
 Accuracy (Best Fit Straight Line): $\pm$ 1.7 %RH
 Package Type: SIP 4 Pin, 100 units on tape and reel
 Total Error Band: $\pm$ 5.0 %RH
 Response Time: τ 63%



Figuur 8: HIH9121-021-001

3.3.4. Randeffecten

Om betrouwbare metingen te kunnen doen is het cruciaal dat de sensoren op de juiste positie geplaatst worden. Hierbij is het van belang dat 'randeffecten' worden uitgesloten omdat deze invloed kunnen hebben op de sensoren. Randeffecten zijn de effecten die aan de rand spelen met betrekking tot onder andere warmteoverdracht. Figuur 9 toont een doorsnede van het schetsconcept van de testopstelling. Hierin stellen de rode stippen het gebied voor waar de randeffecten zich voordoen en het grijze gebied toont een aanzicht van het testmonster (gevel). De aansluiting van het testmonster op de wanden en dak van de testopstelling zorgt voor de randeffecten. De warmteoverdracht die lineair door het testmonster gaat is nagenoeg constant, maar vanwege de aansluiting op de testopstelling wordt deze beïnvloed. Dit gebeurt omdat warmte via de randen deels wordt afgegeven aan de constructie van de testopstelling. Indien er sensoren in het randeffecten-gebied worden geplaatst zullen de waarden voor vochtigheid veranderen aangezien de vochtigheid een gevolg is van de heersende temperatuur. In Figuur 9 wordt ook het gebied getoond waarin de sensoren geplaatst dienen te worden. Dit gebied is centraal in het testmonster geplaatst om deze randeffecten de kunnen vermijden. De groene stippen zijn een indicatie van de sensoren en zeggen niet dat de sensoren ook zodanig geplaatst dienen te worden. Wel wordt aangeraden de sensoren langs de rand en centraal van het 'sensor-gebied' te plaatsen om eventuele verschillen hierin op te merken. Een minimaal van negen sensoren zoals in Figuur 9 is verplicht om een duidelijk beeld te krijgen van het thermohygrisch gedrag in het testmonster.



Figuur 9: sensorgebied n.a.v. randeffecten in dwarsdoorsnede schetsconcept testopstelling.

3.4. Verwarmings- en koelingsinstallatie

In deelonderzoek; dampdiffusie open bouwen is omschreven dat de testopstelling dient te bestaan uit twee klimaatkamers. Paragraaf 3.1 omschrijft dat er op specifieke plekken de temperatuur binnen deze klimaatkamers gemonitord dienen te worden. Deze temperatuur waarden dienen ook bijgesteld te worden naar aanleiding van een simulatieprogramma dat in deelonderzoek; dampdiffusie open bouwen is beschreven. Om dit te realiseren kan de ruimte in de klimaatkamers op verschillende manieren verwarmt en gekoeld worden (zie Tabel 4). In [paragraaf 3.1](#) is omschreven dat de temperatuur in de klimaatkamers geregeld kan worden door middel van lucht. Er is ook de mogelijkheid om straling te gebruiken om de ruimte te verwarmen en/of te koelen.

	Verwarmen	Koelen
Luchttransport	Elektrische verwarming Brandstof verwarming (diesel, olie, gas)	Airconditioning Luchtkoeler
Straling	Klimaatmat Radiator	Klimaatmat

Tabel 4: verwarmings- en koelingsmethoden

Brandstof verwarming maakt gebruik van diesel, kerosine, of stookolie en hebben daarbij een CO² uitstoot die afgevoerd dient te worden door middel van een schoorsteen. Elektrische verwarming maakt gebruik van elektriciteit, is schoon en realiseerbaar tot hoge temperaturen net als aardgas of olie. Ook is voor elektrische verwarming geen afvoer nodig in tegenstelling tot brandstof verwarming. Tevens is er voor aardgas altijd een aansluiting nodig die niet altijd voor hand ligt (Heat Systems; Aterno, 2013; Trotec). Aterno (2013) geeft een overzicht van een vergelijking tussen aardgas, stookolie en elektriciteit (zie Tabel 5).

	<i>aardgas</i>	<i>stookolie</i>	<i>elektriciteit</i>
<i>prijzen brandstof</i>	+++++	++++	+++
<i>rendement**</i>	+++	+++	++++
<i>installatiekost</i>	+++	++	++++
<i>onderhoud</i>	++++	+++	+++++
<i>milieuvriendelijk***</i>	+++	++	++++

"De score gaat van + tot +++++, waarbij één + staat voor matig en vijf + voor uitstekend."

Tabel 5: overzicht vergelijking verwarmingsmethodes (Aterno, 2013).

Tabel 5 toont aan dat elektrische verwarmde systemen gunstiger zijn dan aardgas of stookolie. De brandstof van olie of kerosine verwarming raakt op na een bepaald periode en dient bijgevuld te worden. Elektriciteit en aardgas bevatten deze activiteit niet, echter is elektra gemakkelijker aan en/of om te leggen dan aardgas. Zoals eerder vernoemd dient er rekening te worden gehouden met de flexibiliteit van de testopstelling aangezien de locatie niet is vastgesteld. Aardgas is niet overal aanwezig en is daarom geen gunstige keuze als brandstof toevoer voor verwarmen. Elektriciteit is gemakkelijk aan en/of om te leggen, echter is het wel afhankelijk van de aanwezigheid van een elektriciteitsnetwerk (die vaak wel aanwezig is). Stookolie of kerosine dient constant bijgevuld te worden en is erg geschikt voor mobiele eenheden omdat deze niet via een leiding binnen komt (Verwarmingsinfo). Er kan geconcludeerd worden dat een elektrische verwarmingsinstallatie beter is in verband met onderhoud.

Koelen wordt doorgaans uitgevoerd door middel van een airconditioninginstallatie. Het dalen van de temperatuur gebeurt ook als effect van bevochtigen. Dit wordt in [hoofdstuk 4](#) nader omschreven. Tevens kan de ruimte ook wordt verwarmd door middel van bevochtiging. Dit is afhankelijk van de temperatuur van het vocht dat de ruimte in wordt gebracht.

Uit gesprek met deskundigen op het gebied van klimaatkamer en installatietechniek is naar voren gekomen dat installatie bedrijven de volledige installatie uitvoeren. Dhr. H. Punte, werkende bij Colpro B.V. (2017) en dhr. A. Liefbroer, werkende bij Klima-testtechniek (2017) hebben beide aangegeven het 'tweede schetsconcept' (weergegeven in deelrapport; opbouw testopstelling) te kunnen realiseren. Dhr. A. Liefbroer heeft hierbij aangegeven dat het 'tweede schetsconcept' een bestaande testopstelling is, bekend als een Hot Box testopstelling. Dit wordt nader omschreven in deelrapport; opbouw testopstelling. Vanwege gebrek aan deskundigheid en tijd wordt de opdrachtgever aanbevolen dit nader te bespreken met installatiebedrijven. Het is tevens afhankelijk van hoe de installatiebedrijven te werk gaan en werk apparatuur zij gebruiken.

3.5. Bevochtigings- en ontvochtigingsinstallatie

"Men kan de dampdruk in een afgesloten hoeveelheid lucht bij gelijkblijvende temperatuur verhogen door waterdamp toe te voegen." - (Buishand & Velds).

"Uitgaande van onverzadigde lucht kan verzadiging worden bereikt door waterdamp toe te voegen bij gelijkblijvende temperatuur of door de temperatuur te verlagen bij gelijkblijvende dampdruk." - (Buishand & Velds).

Uit de uitspraken door Buishand en Velds kan worden geconcludeerd dat door waterdamp toe te voegen in een gesloten ruimte de dampdruk verhoogd kan worden. Dhr. P. Best, project manager R&D bij Scheldebouw (2017), zegt dat de vochtigheid binnen een klimaatkamer verhoogd kan worden door damp toe te voegen aan de ruimte. Dit kan onder andere door middel van een ultrasoon bevochtiger. Deze kan gecombineerd worden met de luchttoevoer in een klimaatkamer. Uit interview met dhr. P. Best is naar voren gekomen dat Scheldebouw over testopstelling beschikt waarbij de temperatuur wordt geregeld door middel van lucht in te blazen en die tevens wordt rondgecirculeerd. In overleg met dhr. P. Best is hierbij een concept bedacht waarbij een verstuiver wordt geplaatst na de verwarmingsventilator (zie [paragraaf 3.1](#)) die de damp meeblaast in de klimaatkamer. Ook volgens dhr. D. Remans (Laboratorium manager TNO) kan de relatieve vochtigheid worden geregeld door stoombevochtigers in de klimaatinstallatie te plaatsen. Water wordt in deze stroombevochtiger verhit tot het verdampt en kan samen met de lucht te klimaatkamer in geblazen worden. Hieronder volgt een lijst van mogelijkheden voor het bevochtigen van de klimaatkamers:

- Verneveling onder hoge of lage druk,
- Ultrasoon & infrasoone verdampingsproces,
- Koudverdampingsproces,
- Luchtwater
- Elektrische stoom,
- Gas gestookte stoom.

Luchtbevochtiging kan op verschillende manieren worden uitgevoerd en hebben allemaal verschillende eigenschappen. Sommige bevochtigingsmethoden zijn uit te voeren als adiabatisch. Adiabatisch betekent letterlijk 'niet diabatisch'. Adiabatisch bevochtigen houdt in dat de lucht wordt bevochtigd met water, waarbij geen warmtewisseling is met de omgeving. Dit kan uitgevoerd worden met de volgende methoden (Geveke technical solutions):

- Verneveling onder hoge of lage druk.
- Ultrasoon verdampingsproces.
- Koudverdampingsproces.

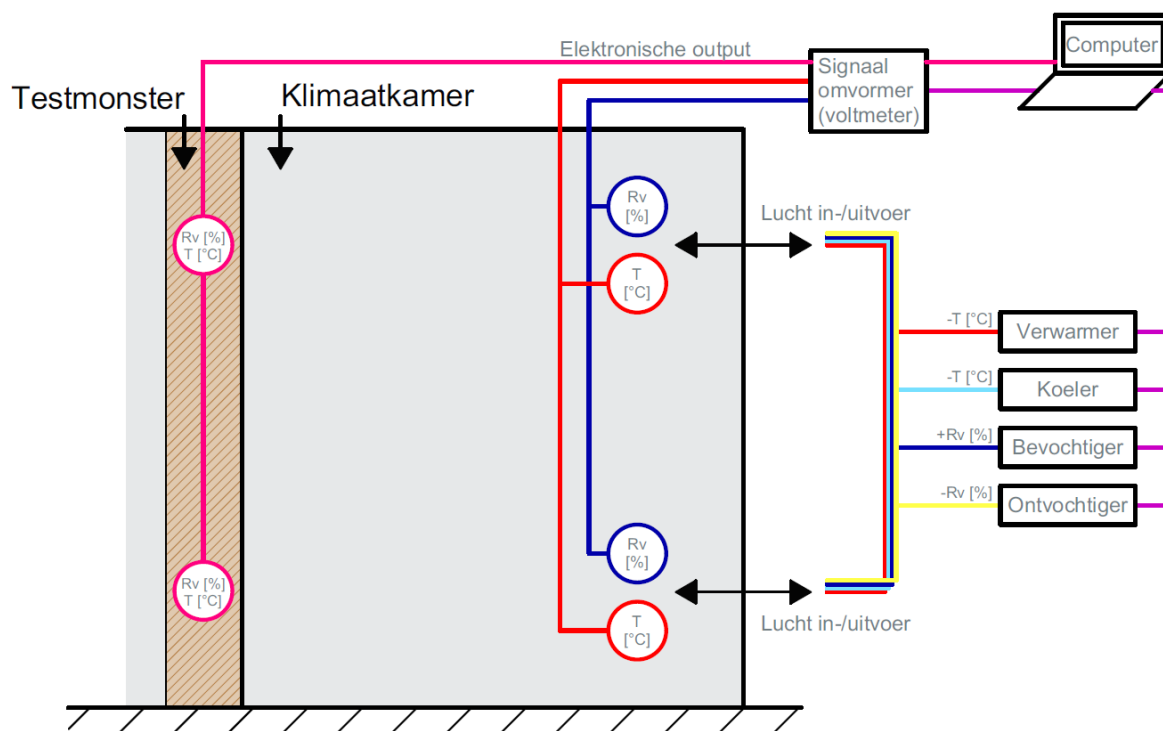
"Een adiabatisch proces, is een proces waarbij geen uitwisseling van warmte met de omgeving plaats vindt." - (Uges)

Een adiabatisch proces kan gunstig zijn met betrekking tot de opstelling als gevolg van dit onderzoek, omdat hierbij kan worden bevochtigd zonder dat er een warmtewisseling plaatsvindt. De verandering van het ene aspect heeft vaak invloed op de ander. Door de dynamische temperatuur- en relatieve vochtigheidswisselingen in de test is het gunstig dat deze twee aspecten los van elkaar veranderd kunnen worden. Dit houdt in dat het gewenst is de temperatuur te veranderen zonder dat de relatieve vochtigheid verandert en andersom. Echter kan het ook gunstig zijn deze effecten te gebruiken. Zoals in [paragraaf 3.4](#), is aangegeven daalt of stijgt de temperatuur als er vocht wordt toegevoegd aan de lucht. Indien de vochtigheid verhoogd dient te worden kan de temperatuur hierbij worden aangepast door vocht toe te voegen met een hogere of lagere temperatuur. In [hoofdstuk 4](#) wordt dit effect nader omschreven.

Het is hierbij aanbevolen om een adiabatische bevochtigingsinstallatie toe te passen. Echter vanwege gebrek aan deskundigheid en tijd wordt de opdrachtgever aanbevolen dit nader te bespreken met installatiebedrijven. Het is tevens afhankelijk van hoe de installatiebedrijven te werk gaan en werk apparatuur zij gebruiken.

3.6. Apparatuur aansluiting

De gegevens die waargenomen worden door de thermo- en hygrosensoren dienen doorgegeven te worden aan een datalogger en/of computer. Volgens de website van Pedak worden bij veel dataloggers de software gratis bijgeleverd. Op de website van Trotec wordt aangegeven dat zij de analyse- en beheers software bij elk product meeleveren. De datalogger dient in deze testopstelling de temperatuur, relatieve vochtigheid en mogelijk dampspanning op te slaan. Figuur 10 toont een schematische weergave van het principe van hoe de apparatuur in de testopstelling aangesloten dient te worden. In deze apparatuur aansluiting gaat het om de klimaatkamerregeling. De sensoren die zich in het testmonster bevinden dienen alleen gegevens door te geven aan een datalogger en/of computer, maar hebben geen gevolg op de klimaatinstallaties. Zoals eerder genoemd is het van belang dat binnen de klimaatregeling de signalen van de sensoren worden opgeslagen in een datalogger en/of computer. Als gevolg van deze signalen dient de computer de apparatuur aan te sturen indien nodig. De apparatuur verwarmt, koelt, bevochtigt of ontvochtigt de klimaatkamers, waarna de sensoren deze veranderingen weer waarnemen en als signaal doorgeven aan de datalogger en/of computer. De kennis over dit onderwerp is beperkt en wordt daarom niet verder uitgewerkt. Wel wordt de opdrachtgever aanbevolen dit door een deskundige uit te laten werken.



Figuur 10: het schematisch principe van apparatuur aansluiting in de testopstelling

4. 'Het Mollierdiagram in praktijk'

Het artikel 'Het Mollierdiagram in theorie en praktijk' dat geschreven is door Uges in het vaktijdschrift 'Koude & luchtbehandeling', behandelt de aspecten; verwarmen, bevochtigen, ontvochtigen en koelen in relatie tot het Mollierdiagram. Het deelrapport omschrijft hoe het Mollierdiagram af te lezen is en welke waarden je onder andere hieruit kan aflezen. Dit hoofdstuk richt zich op de praktijk ervaring in relatie tot het Mollierdiagram dat in het artikel van Uges is omschreven.

4.1. Verwarmen

Verwarmen is een aspect dat in de praktijk net zo werkt als dat in het Mollierdiagram is aangegeven. Verwarmen wordt in het Mollierdiagram aangegeven met een rechte lijn naar boven (lijn 3 in Figuur 11), waarbij de relatieve vochtigheid daalt. In de praktijk is het hierbij wel belangrijk dat er geen andere lucht, met mogelijk een andere relatieve vochtigheid wordt toegevoegd. Het gaat hier dan om het verwarmen van de aanwezige lucht. In de klimaatkamers van de testopstelling is het daarom belangrijk dat als er verwarmt wordt er rekening gehouden wordt dat de relatieve vochtigheid mee verandert. De relatieve vochtigheid dient dan ook aangepast te worden indien nodig naar aanleiding van vooraf bepaalde simulatiewaarden.

4.2. Bevochtigen met water of stoom

Bij bevochtigen met water of stoom wordt vocht aan de droge lucht toegevoegd in de vorm van verdamping. Een adiabatische verzadiging speelt hierbij een belangrijk rol. Paragraaf 3.5 omschrijft wat 'adiabatisch' inhoud. Uges beschrijft een voorbeeld dat hieronder is weergegeven, waarbij er waterdamp aan droge lucht wordt toegevoegd.

Aan 1 kg droge lucht wordt X gr water toegevoegd van 0 °C. De enthalpie hiervan is: $1.t \text{ kJ} \times X \text{ gr}$
Water met 0 °C heeft als enthalpie: $1.t \text{ kJ} \times X \text{ gr} = 0 \text{ kJ}$. Een vloeistof met een temperatuur van 0 °C heeft, als gevolg van deze enthalpie, per definitie een waarde van 0 kJ. Dus de menging hiervan is nog steeds 1.t. Echter beschrijft Uges dat de X gr is verdampt en hiervoor is warmte aan de lucht onttrokken. Als eindresultaat heeft de nu vochtige lucht een lagere temperatuur dan dat van de droge lucht (lijn 4 & 5 in Figuur 11).

De temperatuur van het toe te voegen vocht speelt hierbij een belangrijk rol. Om de juiste simulaties in de klimaatkamers te kunnen simuleren dient rekening gehouden te worden dat de temperatuur kan veranderen bij het toevoegen van waterdamp aan de lucht. De temperatuur dient dan ook aangepast te worden indien nodig naar aanleiding van vooraf bepaalde simulatiewaarden.

4.3. Verwarmen en tegelijk bevochtigen

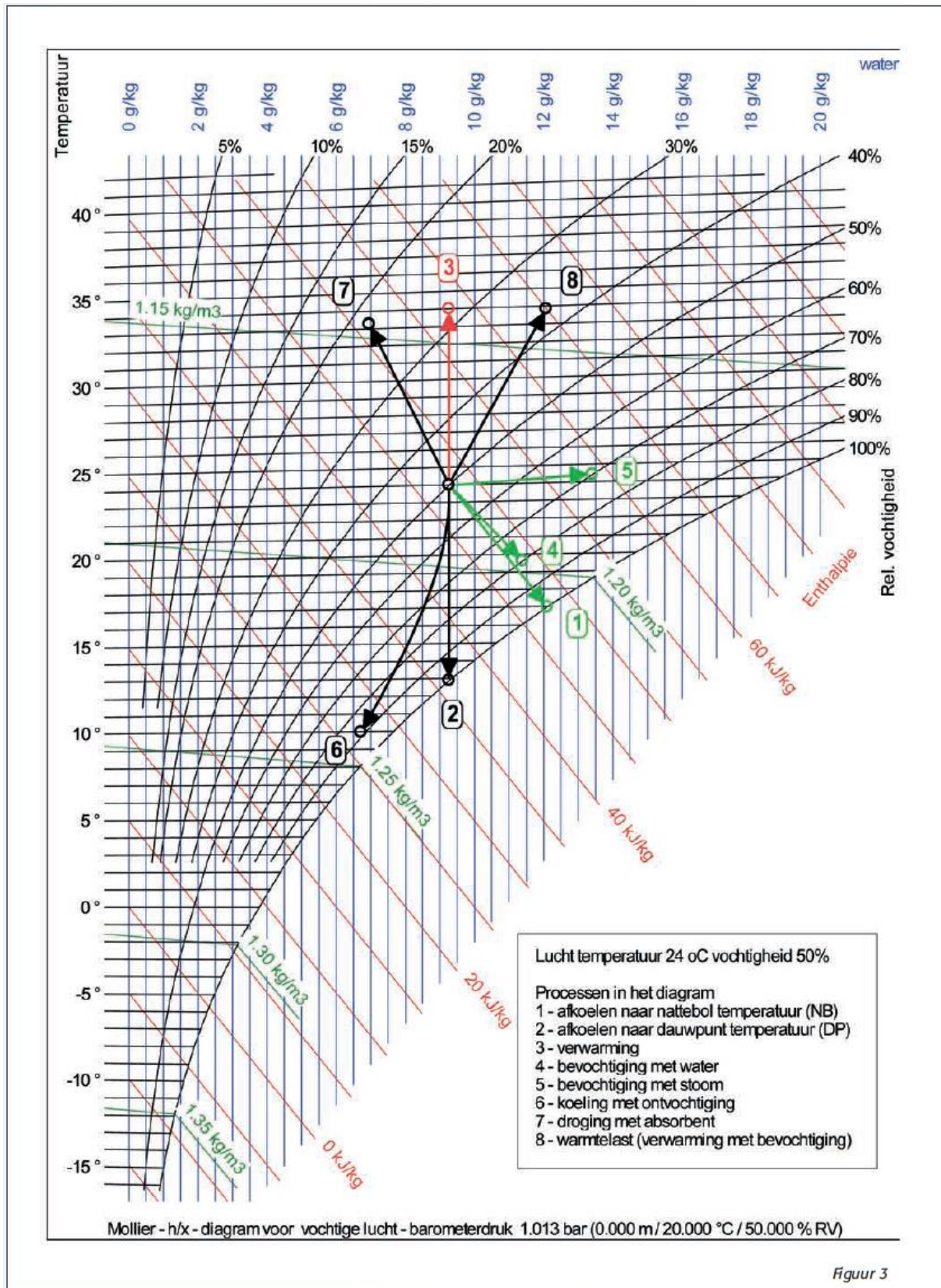
Lijn 8 in Figuur 11 geeft de toestand weer van verwarmen, waarbij tegelijk ook wordt bevochtigd. Hierbij dient rekening gehouden te worden met dat de relatieve vochtigheid wordt verlaagd als de temperatuur wordt verhoogd. Indien het gewenst is om de temperatuur te verhogen terwijl de relatieve vochtigheid dezelfde waarde hoort te behouden, dient er ook bevochtigd te worden.

4.4. Ontvochtiging

"Ontvochtiging treedt op zodra de oppervlakte temperatuur van de koeler lager is dan het dauwpunt van de er langs stromende lucht." - (Uges).

Op de horizontale as van het Mollierdiagram kan worden afgelezen tot in hoeverre er wordt ontvochtigd bij een gelijkblijvende temperatuur. Uges zegt dat er wordt ontvochtigd als de oppervlakte temperatuur van de koeler lager ligt dan het dauwpunt van de er langs stromende lucht. Dit houdt in dat er automatisch ook gekoeld wordt bij ontvochtigen. In Figuur 11 wordt dit aangegeven met lijn 6. Indien een bepaalde temperatuur behouden wenst te worden, maar er wel ontvochtigd dient te worden zal de lucht weer bijgesteld moeten worden voordat deze terug de klimaatruimte ingestuurd wordt. Hiervoor dient een juiste berekening te worden gedaan, omdat zodra er verwarmd wordt de relatieve vochtigheid ook mee veranderd.

Indien er niet ontvochtigd wilt worden moet de temperatuur van de koeler boven het dauwpunt van de langs stromende lucht. Uges beweert dat installaties die gebruik maken van een DX-systeem nagenoeg altijd ontvochtigen. Indien water wordt gebruikt als koudedragers is het goed mogelijk de oppervlakte temperatuur boven het dauwpunt te houden. Plafondkoeling en Dauwpuntkoeling zijn voorbeelden hiervan.



Figuur 11: Het Mollierdiagram in praktijk, bron data; (Uges).

5. Parameters

De uitkomsten van de testen zijn afhankelijk van de aantal parameters waaraan gemeten wordt. Parameters zijn variabelen die de uiteindelijke waarde bepalen. Het is in deze testopstelling van belang om deze parameters op voorhand te bepalen zodat er rekening gehouden kan worden met de uitkomst. Het eerder dat bepaald dient te worden is wat voor soort gevelement er getest dient te worden. In het kader van dit onderzoek worden de volgende parameters omschreven met hun invloed en gevolgen in de testopstelling (zie Tabel 6).

Parameters	Invloed / gevolg
Enkele laags/lagen gevel	De eenvoudigste manier van testen is het testen van een enkel laags gevel die bestaat uit 1 vlak. Hier wordt dan gemeten op dampdiffusie. Mochten er meerdere lagen worden getest, bestaande uit enkele vlakken dan blijft het in principe hetzelfde, maar kan inwendige condensatie ook worden gemeten. Dit heeft voor beide geen verdere gevolgen dan de waarden te nemen afkomstig uit de sensoren en kan er puur gekeken 2D naar de waarden gekeken worden. Indien het niet uit 1 vlak bestaat is er sprake van eventuele luchtlekken.
Samengestelde gevel	Bij een samengestelde gevel komt het sneller voor dat inwendige condensatie optreedt. Een samengestelde gevel kan punten in de gevel bevatten die als koudebruggen kunnen veroorzaken. Ook is het in een samengestelde gevel vaak het geval dat er niet 2D naar gekeken kan worden, maar dient hier 3D naar gekeken te worden. Neem bijvoorbeeld een houtskeletbouw (HSB) gevelement waarbij in de houten delen een andere vochttransport optreedt dan in de isolatiedelen. Tevens komt het bij een samengestelde gevel nagenoeg altijd voor dat er sprake is van luchtlekken.
Temperatuur en relatieve vochtigheid	Deze parameters zijn de een gevolg van het bepalen van de locatie en het bijhorende klimaat.
Dampdiffusie	De dampdiffusie speelt een grote rol in het vochttransport in een gevelconstructie. Dit dient dan ook altijd gemeten te worden door het vochtgehalte in het testmonster te monitoren.
Inwendige condensatie	Inwendige condensatie kan worden gemeten door de sensoren die geplaatst zijn in het testmonster. Het is van belang om te weten of er in inwendige condensatie optreedt en hoelang dit vocht zich in de gevel bevindt. Op deze manier kan bepaald worden of dit niet voor (vorst)schade, schimmel of negatieve energie waarden kan worden.
Vochtgehalte hout	Dit kan worden uitgevoerd voor vochtgehalte sensoren of door het naderhand uitvoeren van een Darr-methode. Het is belangrijk om het vochtgehalte in hout te meten om houtrot te monitoren.
Luchtlekken	Luchtlekken zijn funest en het is belangrijk om te bepalen of dit tijdens de test wordt meegenomen. Bij een gevel is er nagenoeg altijd sprake van

aansluitingen. Deze aansluitingen worden in de praktijk niet altijd 100% luchtdicht uitgevoerd. Door deze luchtlekken kan vocht zich zonder weerstand verplaatsen. Dit kan een vertekend beeld geven van het vochttransport in een gevel.

Wind en zonlicht	In het kader van dit onderzoek zijn wind en zonlicht niet meegenomen, omdat deze een positieve werking hebben bij het afvoeren van vocht uit de gevel. Dus als de gevel zijn vocht kan afvoeren zonder wind en zonlicht zal die ook voldoen met deze factoren. Wel is het gunstig deze parameters mee te nemen om een juiste meting te kunnen doen. Een mogelijkheid hiervoor is om infraroodlampen en ventilatoren te plaatsen in de testopstelling. Hier dient echter nader onderzoek naar gedaan te worden, omdat in dit onderzoek dit niet wordt behandeld.
Dag en nacht	De invloed van dag en nacht spelen een rol bij de dampdiffusie, omdat zowel de temperatuur buiten als binnen veranderen gedurende deze perioden. Echter is er ook afhankelijk van hoelang de duur van de test is en of dit op jaarbasis nog effect heeft.
Randeffecten / koudebruggen	Er dienen meerdere sensoren op een juiste positie te worden geplaatst om verschillende tussen de sensoren te kunnen monitoren. Indien er significante verschillen optreden dient hier nader naar gekeken te worden. Dit kan aan de randen van het sensoren gebied liggen aan randeffecten. Echter kan het ook een gevolg zijn van luchtlekken of koudebruggen. Indien dit het geval is dienen de sensoren opnieuw gepositioneerd te worden of dienen de koudebruggen te worden verholpen.

Tabel 6: parameters

6. Conclusie

Het vochtgehalte in het testmonster dient gemeten te worden. Hiervoor kunnen vochtsensoren gebruikt worden, echter is het onbekend of deze mogelijkheid er is. Deze vochtsensoren dienen tussen de lagen van de gevelconstructie geplaatst te worden en eventueel in de isolatielaag. Op deze manier kan vocht worden gemeten op de gewenste locaties. Het is ook van belang houtconstructies te meten op vochtgehalte om het risico op houtrot te detecteren. Het risico op houtrot is aanwezig bij een vochtgehalte van $\geq 21\%$. Dit vochtgehalte kan op meerdere methoden worden gemeten, echter vanwege de mogelijkheid om de DARR-methode naar de testopstelling uit te voeren en de nauwkeurigheid van de methode, het is aanbevolen om dit volgende Darr-methode uit te voeren. De andere methode zijn minder nauwkeurig, maar kunnen wel op locatie worden uitgevoerd. Echter is het in dit onderzoek niet van belang dat de testen op locatie uitgevoerd dienen te worden en wordt dit voordeel uitgesloten.

Uit deelrapport; dampdiffusie open bouwen is naar voren gekomen dat met de opdrachtgever is besloten om een Nederlands klimaat aan te houden binnen de testopstelling. Hierbij is besloten om de volgende waarden aan te houden binnen de testopstelling.

- o temperatuur van -15°C tot 40°C
- o relatieve vochtigheid van 10% tot 95%.

Apparatuur dient in staat te zijn deze waarden te kunnen realiseren binnen de gewenste tijd als gevolg van simulatieprogramma's weergegeven in deelrapport; dampdiffusie open bouwen. Ook sensoren dienen in staat te zijn om deze waarden te kunnen waarnemen en tevens een digitaal signaal door te kunnen geven aan een datalogger en/of computer. Sensoren dienen op juiste plekken te worden geplaatst zoals weergegeven in de tabel hieronder:

	Klimaatkamer 'binnen'		Klimaatkamer 'buiten'		Gevel (monster) Tussen lagen	Gevel in 'dikke' lagen (indien mogelijk)	Sensor
	invoer	uitvoer	invoer	uitvoer			
Temperatuur [°C]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Thermo-sensor
Relatieve vochtigheid [%]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Hygro-sensor

Het temperatuurbereik is niet heel groot vergeleken bij het groot scala aan sensor mogelijkheden. Er zijn daarom vele thermosensoren mogelijk binnen dit onderzoek. Er is echter beperkte deskundigheid en tijd om de meest gunstige thermosensoren te bepalen. Het is hierbij aanbevolen om een deskundige nader onderzoek te laten doen naar de geschikte thermosensor. Wel kan worden geconcludeerd dat er voldoende mogelijkheden aan thermosensoren zijn die voldoen aan de randvoorwaarden in dit onderzoek.

Het vochtgehaltebereik kan gemeten worden door middel van hygrosensoren. Echter vanwege beperkte deskundigheid en tijd om de meest gunstige hygrosensoren te bepalen is hierbij aanbevolen om een deskundige nader onderzoek te laten doen naar de geschikte thermosensor. Wel is nader onderzocht of er een mogelijkheid is om sensoren in het testmonster te plaatsen om de dampdiffusie in het testmonster te kunnen monitoren. Deze sensoren dienen vanwege de eis op specifieke afmetingen uitgevoerd te worden in elektrische hygrosensoren. Van de twee soorten elektrische hygrosensoren is de capacitieve sensoren het meest geschikt, omdat deze een groter meetbereik heeft en nauwkeuriger waarneemt. Concluderend kan worden gesteld dat er elektrische hygrosensoren bestaan met dusdanige afmetingen dat deze tussen de lagen van het testmonster geplaatst kunnen worden. Het is daarom ook mogelijk om het vochtgehalte waar te nemen in het testmonster, echter is het nog discutabel of deze metingen betrouwbaar zijn. Het is daarom aanbevolen om, vooral in hout, het vochtgehalte naderhand alsnog te meten door middel van de Darr-methode om de eind toestand te meten. Uit deze waarde kan geconcludeerd worden om er vochtophoping zich voordoet naar aanleiding van dampdiffusie.

Als gevolg van randeffecten dienen de sensoren centraal geplaatst te worden in het testmonster. Wel is het verplicht een minimaal van negen sensoren toe te passen zoals weergegeven in Figuur 9. Deze dienen zodanig geplaatst te worden dat er een goed beeld gecreëerd wordt van het thermohygrisch gedrag in het testmonster. De sensoren kunnen geplaatst worden zoals weergegeven in Figuur 9.

Elektrische verwarmingsinstallaties zijn gunstiger dan installaties op aardgas of stookolie. Er is hierbij rekening gehouden met de flexibiliteit van de testopstelling, omdat de locatie nog niet is vastgesteld. Elektrische aansluiting is gemakkelijker aan te brengen ten opzichte van een aardgas aansluiting en stookolie dient regelmatig bijgevoerd te worden.

Vanwege gebrek aan deskundigheid en tijd kan niet worden bepaald welke van de volgende methode het meest geschikt is voor het bevochtigen en ontvochtigen van de klimaatkamers:

- Verneveling onder hoge of lage druk,
- Ultrasoon & infrasoone verdampingsproces,

- Koudverdampingsproces,
- Luchtwater
- Elektrische stoom,
- Gas gestookte stoom.

Wel is vastgesteld dat een adiabatisch proces gunstig kan zijn in de testopstelling. Dit heeft te maken met het feit dat een adiabatisch proces geen warmtewisseling heeft met zijn omgeving bij het bevochtigen of koelen. Dit betekent dat de simulatie nauwkeuriger uitgevoerd kan worden zonder teveel andere factoren bij te hoeven sturen. Vanwege gebrek aan tijd en deskundig op installaties wordt aanbevolen om dit nader te laten onderzoeken door een deskundige.

Naar aanleiding van contact met deskundigen kan wel worden geconcludeerd dat installatiebedrijven in staat zijn de gehele installatie van de testopstelling te realiseren. De uiteindelijke realisatie is hierbij afhankelijk van de materialen en apparatuur waarmee het installatiebedrijf werkt.

De apparatuur binnen de testopstelling dient ook op de juiste wijze te worden aangesloten. De sensoren in de klimaatkamers doen waarnemingen voor de temperatuur en de relatieve vochtigheid. Deze zenden deze waarden door via een digitaal signaal naar een datalogger en/of computer. De computer gebruikt deze gegevens en slaat ze op. Naar aanleiding hiervan kan er een signaal naar de verwarmings-, koelings-, bevochtigings- en ontvochtigingsapparatuur worden gestuurd zodat zij het klimaat weer aan kunnen passen indien gewenst. Deze aansluiting van apparatuur dient aangesloten te worden volgens het schematische concept weergegeven in Figuur 10.

De temperatuur en vochtigheid liggen sterk met elkaar in relatie. Het Mollierdiagram geeft deze relatie weer, echter wijkt deze in de praktijk hier lichtelijk vanaf. Verwarmen kan wel uitgevoerd worden zoals in het Mollierdiagram is aangegeven. Bij bevochtigen speelt de temperatuur van het toegevoegde vocht een grote rol. Dit bepaald of de temperatuur stijgt of daalt zodra er wordt bevochtigd. Bij ontvochtiging dient er rekening gehouden te worden met de temperatuur en of deze zich onder of boven het dauwpunt bevindt. Er wordt hierbij dus vaak ook gekoeld als er wordt ontvochtigd. Hierbij kan geconcludeerd worden dat de vochtigheid en temperatuur niet los van elkaar gezien kunnen worden en dat als er één van deze twee waarden veranderd wordt dat het andere mee kan veranderen. Dit leidt tot zorgvuldige berekeningen waarbij beide aspecten op de juiste waarden worden gesimuleerd.

Het is van belang op voorhand te bepalen welke parameters er meegerekend worden in het uitvoeren van de testen. Zo zijn er bepaalde parameters die altijd meegerekend dienen te worden zoals; temperatuur, relatieve vochtigheid, dampdiffusie, inwendige condensatie. Andere parameters zijn afhankelijk van de gevel die getest gaat worden. Hier is van belang om op voorhand te bepalen of de volgende parameters meegenomen dienen te worden;

- Vochtgehalte hout
- Luchtlekken
- Wind en zonlicht
- Dag en nacht
- Randeffecten en koudebruggen

7. Literatuurlijst

- Aterno. (2013, 12 18). *Elektrische verwarming, olie of gas?* Opgehaald van Aterno: <http://www.aterno.be/nl/elektrische-verwarming-olie-gas.html>
- Athene Noctua. (2016). *Vochtgehalte*. Opgehaald van Anthene Noctua: <https://www.athene-noctua.nl/publicaties/wat-waarom-zinvol-meten-van-bouwfysische-elementen/meten-vocht-vochtgehalte/>
- Bekker, P. (2010, November 12). *CM-meting*. Opgehaald van Trotec: <http://www.trotec-blog.com/nl/vdl/cm-meting-2/>
- Bekker, P. (2010, November 22). *Vocht meten in hout*. Opgehaald van Trotec: <http://www.trotec-blog.com/nl/vdl/vocht-meten-in-hout/>
- Best, P. (2017, 3 8). Klimaatkamers Scheldebouw. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Buishand, T., & Velds, C. (sd). *Klimaat van Nederland 1. Neerslag en verdamping*. Nederland: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Derome, D., Fazio, P., Anthientis, A., & Rao, J. (sd). *Use of an environmental chamber to investigate large-scale envelope specimen hygrothermal performance*. Montreal: Concordia University.
- Dinant. (sd). *Vochtmeting*. Opgehaald van Dinant: <http://www.dinantvochtbestrijding.nl/uitgebreide-vochtmeting>
- Electronic Tutorials. (sd). *Temperature Sensors*. Opgehaald van Electronic-tutorials: http://www.electronic-tutorials.ws/io/io_3.html
- Geveke technical solutions. (sd). *Adiabatische bevochtiging en koeling*. Amsterdam & Vilvoorde, Nederland & België.
- Heat Systems. (sd). *Elektrisch / gas / olie gestookt*. Opgehaald van Heat Systems: http://www.heatsystems.nl/Heats/index.php?option=com_content&task=view&id=39&Itemid=107
- Jain, P. (2012). *Humidity Sensor*. Opgehaald van Engineers Garage: <https://www.engineersgarage.com/articles/humidity-sensor?page=1>
- Liefbroer, A. (2017, Mei 15). Realisatie klimaatkamer. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Punte, H. (2017, Mei 2). Realisatie klimaarkamer. (Y. Verhoeven, Interviewer)
- Remans, D. (2017, 4 3). Klimaatkamers TNO. (Y. Verhoeven, Interviewer) Nederland.
- Renotec Duo. (sd). *Vochtmeting*. Bergen op Zoom, Noord-Brabant, Nederland.
- Trotec. (sd). *Verwarming*. Opgehaald van Trotec: <https://nl.trotec.com/producten/machines-highperformance/verwarming/>
- Uges, P. (sd). *Het Mollierdiagram in theorie en praktijk*. Opgehaald van Airco-Kenniscentrum.
- Verwarmingsinfo. (sd). *Mazoutketel*. Opgehaald van Verwarmingsinfo: <https://www.verwarmingsinfo.nl/mazoutketel>

Bijlage V



Randvoorwaarden testopstelling & ontwerp

Wat is de meest optimale testopstelling om verschillende randoplossingen in te testen?

Deelonderzoek
Versie 2

Auteur: Y. Verhoeven
Studentnummer: 66801
Opleiding: Bouwkunde Voltijd

HZ University of Applied Sciences
1^e begeleider: I. Weegels
2^e begeleider: B. Vercouteren

Centre of Expertise Biobased Economy,
lectoraat biobased bouwen
Stagebegeleider: W. Böttger

Inhoud

1.	INLEIDING	1
2.	RANDVOORWAARDEN DEELONDERZOEKEN	1
3.	HET EERSTE SCHETSCONCEPT	2
4.	HET TWEEDE SCHETSCONCEPT	2
4.1.	AFWERKING OPPERVAKTEN	2
4.2.	AANSLUITING ELEMENTEN	3
4.3.	AFMETINGEN TESTMONSTER	4
4.4.	REALISATIE MOGELIJKHEDEN	4
5.	HOT BOX METHODE	5
5.1.	GUARDED HOT BOX METHODE	6
5.2.	CALIBRATED HOT BOX METHODE	6
5.3.	BESTAANDE HOT BOX TESTOPSTELLINGEN	8
5.4.	EEN BETAALBARE HOT BOX TESTOPSTELLING	9
5.5.	NEDERLANDSE NORMEN	11
6.	CONCLUSIE	12
	BIBLIOGRAFIE	14

1. Inleiding

Uit de deelonderzoeken over 'dampdiffusie open bouwen', 'thermohygrische eigenschappen', 'wet- & regelgeving' en 'meetmethodes en (meet)apparatuur' zijn conclusies getrokken die invloed hebben bij het ontwerp van de testopstelling. Deze conclusies zijn in dit deelonderzoek samengevoegd samen met eisen die van belang zijn voor de kwaliteit van de testopstelling. Gezamenlijk leiden deze tot beslissingen voor de testopstelling.

2. Randvoorwaarden deelonderzoeken

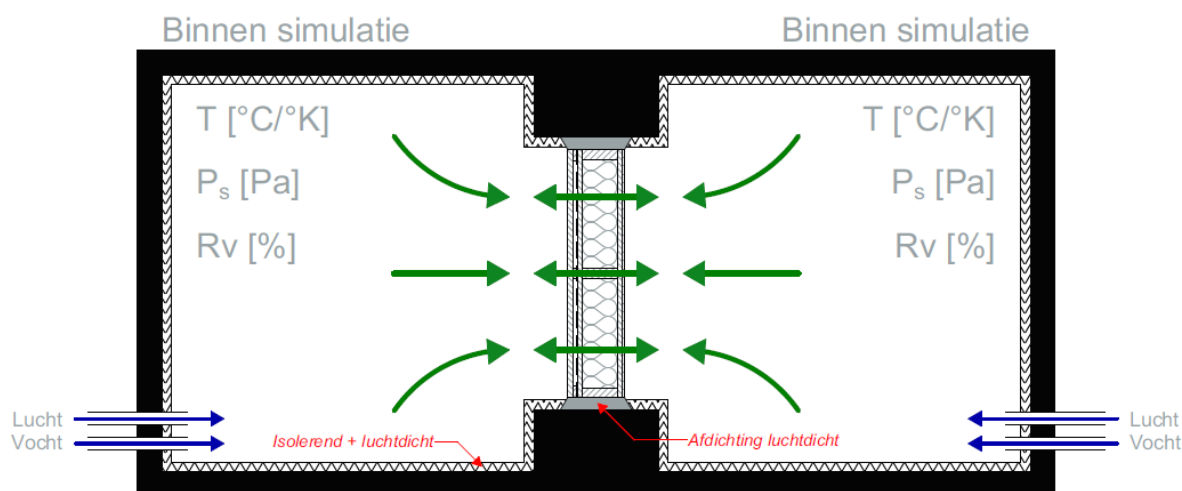
Damptransport door een materiaal is een gevolg van verschil in dampspanning tussen twee ruimtes. Dit resulteert erin dat de testopstelling gebruik maakt van twee klimaatruimtes waartussen het testmonster (gevel) geplaatst kan worden. Deze klimaatkamers zijn aan elkaar gekoppeld en kunnen individueel een klimaat simuleren. Dampspanning is onder andere een gevolg van de heersende temperatuur. Dampdiffusie open bouwen gaat uit van het vochtregulerend vermogen van isolatiemateriaal en de damp afgiftecapaciteit van een gevelconstructie. Het klimaat is de bepalende factor bij het damptransport en bij dampdiffusie open bouwen is het van belang dat er uitgegaan wordt van een jaarcyclus, omdat dit een herhaaldelijk proces is waarin een stijgende en dalende periode is met betrekking tot de temperatuur. Deze jaarcyclus bepaalt de klimaatsimulatie in de 'buiten-klimaatkamer'. In de klimaatkamers dient een bepaalde klimaat gesimuleerd te worden. Om betrouwbare waarden te krijgen als gevolg van waarnemingen door sensoren is het van belang de klimaatkamers dampdiffusiedicht uit te voeren. Hierdoor kan de damp niet (gemakkelijk) uit de klimaatkamers ontsnappen en is er geen sprake van waarden schommelingen. Dit zelfde principe geldt voor de temperatuur waarden, waarbij het van belang is dat de klimaatkamers geïsoleerd uitgevoerd dienen te worden. Om betrouwbare waarden voor zowel de relatieve vochtigheid als de temperatuur waar te kunnen nemen zijn kieren en koudebruggen funest. Hierbij dienen alle aansluitingen luchtdicht en tevens koudebrug vrij te zijn uitgevoerd. Voor de klimaatkamerregeling dienen de; temperatuur, relatieve vochtigheid en dampspanning gemonitord en geregeld te worden. Tevens dient de capaciteit van de testopstelling met betrekking tot apparatuur te voldoen aan de bijhorende waarden. Tabel 1 geeft een overzicht weer van randvoorwaarden waarvan de testopstelling dient te voldoen volgens conclusies afkomstig uit deelonderzoek; dampdiffusie open bouwen.

- | |
|---|
| ○ Twee gekoppelde klimaatruimtes. |
| ○ Testmonster (gevel) tussen klimaatruimtes. |
| ○ Elke klimaatruimte een eigen klimaatregeling. |
| ○ Klimaatregeling monitoren en regelen op; temperatuur, relatieve vochtigheid en dampspanning. |
| ○ Klimaatkamers dampdicht uitvoeren. |
| ○ Klimaatkamers luchtdicht uitvoeren. |
| ○ Klimaatkamers geïsoleerd uitvoeren. |
| ○ Aansluitingen koudebrug vrij uitvoeren. |
| ○ Temperatuur van 15°C tot 40°C. |
| ○ Relatieve vochtigheid van 10% tot 95%. |
| ○ Simulatie dient uitgevoerd te worden op basis van een 'seizoen-cyclus' (1 jaar). Dit betekent niet dat de tijdperiode van de test een jaar dient te bedragen. |

Tabel 1: lijst randvoorwaarden testopstelling.

3. Het eerste schetsconcept

De opbouw van de testopstellingen heeft een verloop van ontwikkelingen ondergaan. De eerste opzet van een testopstelling is tot stand gekomen naar aanleiding van het gesprek met dhr. P. Kuindersma (2017). De opstelling in Figuur 1 is het gevolg van de randvoorwaarden die eist dat er twee klimaatruimtes aanwezig dienen te zijn. Door de twee ruimtes op de juiste wijze te koppelen kunnen deze de binnen- en buitenklimaten simuleren om de juiste damptransport door het testmonster te creëren.



Figuur 1: schetsconcept testopstelling nummer 1

4. Het tweede schetsconcept

Naar aanleiding van het schetsconcept in Figuur 1 is contact opgenomen met deskundigen op het gebied van klimaatkamers en installaties. Uit dit contact zijn meerdere randvoorwaarden in beeld gebracht met betrekking tot de realisatie van de testopstelling.

4.1. Afwerking oppervlakten

D. Remans, laboratorium manager bij TNO (2017), zegt dat de afwerking van de wanden 'glad' dienen te zijn in verband met reinigbaarheid. Dit kan uitgevoerd worden in roestvrijstaal (RVS) plaat of kunststofplaat. Wel is het zo dat RVS een 'oneindig' hoge dampdiffusiedichte weerstand heeft, terwijl deze bij kunststof lager ligt. Ook zegt D. Remans dat de isolatie van de klimaatkamers vooral worden uitgevoerd in de vorm van schuimblokken. Hierbij dient wel, zoals eerder aangegeven in Tabel 1, goed gelet te worden op koudebruggen bij de aansluitingen.

A. Krimpenfort, medewerker marketing & PR bij Roma Nederland B.V. (2017), zegt dat klimaat testruimten dampdicht uitgevoerd dienen te worden om de basis condities van te kunnen vertrouwen. Ook geeft A. Krimpenfort aan dat het principe van 'dampdicht' verschilt met dat van 'luchtdicht'. Bij luchtdicht uitvoeren komt het erop neer dat er geen openingen of kieren mogen voorkomen, waar lucht (inclusief vocht) zich doorheen kan verplaatsen. Het principe van 'luchtdicht' wordt nader omschreven in het deelrapport; dampdiffusie open bouwen. A. Krimpenfort geeft aan dat de wanden van de testopstelling voldoende bestand dienen te zijn tegen eventuele hoge relatieve vochtigheden. Dit kan uitgevoerd worden door

middel van een coating op de wand- en plafondoppervlakken. Hij zegt dat in veel vergelijkbare testopstellingen de binnenzijden geheel uitgevoerd is in RVS. Er bestaan verschillende soorten legeringen van roestvrijstaal met elk zijn kenmerken. Volgens A. Krimpenfort zijn RVS-304 of RVS-316 al voldoende voor de testopstelling. Het verschil tussen RVS-304 en RVS-316 zit hem in de corrosiebestendigheid. Waarbij deze hoger is van RVS-316 en daardoor meer bestendig is tegen chloriden, zouten en zuren (Hoefnagel, 2016).

Isocab (2013) verteld in hun 'selectie- en onderhoudsgids voor coatings' dat de coatings die zij gebruiken voldoen aan NEN-EN-ISO 12944-2; *Verven en vernissen - Bescherming van staalconstructies tegen corrosie door middel van verfsystemen - Deel 2: Indeling van belastingsklassen*. Deze norm gaat uit van corrosieklassen die onderverdeeld is in 5 klassen; C1 tot en met C5 (zie Tabel 2).

Corrosieklasse	Toepassing
C1 - Zeer laag	Droge omgeving, geen beschadiging door bijtende chemicaliën en/of micro-organismen. Routinematige reiniging (niet vaker dan eenmaal per maand) met neutrale reinigingsmiddelen.
C2 - Laag	Omgeving waar mogelijk condensatie optreedt, geen beschadiging door bijtende chemicaliën en/of micro-organismen. Incidenteel komen spatten van licht bijtende vloeistoffen op de muren terecht. Routinematige reiniging (niet vaker dan eenmaal per maand) met neutrale reinigingsmiddelen.
C3 - Gemiddeld	Omgeving die regelmatig een hoge luchtvochtigheid bereikt en waar bijtende chemicaliën en/of micro-organismen aanwezig zijn. Niet-intensieve reiniging (niet vaker dan eenmaal per week) m.b.v. reinigingsmiddelen met een hogere pH (pH tussen 5 en 9).
C4 - Hoog	Omgeving die constant een hoge luchtvochtigheid bereikt en waar bijtende chemicaliën en/of micro-organismen aanwezig zijn. Intensieve reiniging (niet vaker dan eenmaal per dag) m.b.v. reinigingsmiddelen met een hogere pH (pH tussen 5 en 9).
C5 - Zeer hoog	Omgeving die een permanent hoge luchtvochtigheid heeft en waar bijtende chemicaliën en/of micro-organismen aanwezig zijn. Intensieve reiniging (niet vaker dan eenmaal per dag) m.b.v. reinigingsmiddelen met een hogere pH (pH tussen 5 en 9).

Tabel 2: corrosieklassen NEN-EN-ISO 12944-2, bron data; (Isocab nv, 2013).

Deelrapport; wet- & regelgeving beschrijft dat in NEN-EN-ISO 12572 nader omschreven wordt dat, bij het bepalen van de dampdiffusieweerstand van een dampdiffusie open materiaal, gedistilleerd water gebruikt dient te worden. Ook wordt hier het concept van het kritische vochtgehalte omschreven en wat voor effecten zoutoplossingen hebben op de relatieve vochtigheid. Tevens is geconcludeerd dat, vanwege de variërende relatieve vochtigheden, er geen voorkeur is voor gedistilleerd water noch een zoutoplossing. Wel kunnen zouten een nadelig effect hebben op de afwerking van de testopstelling (RVS) zoals eerder is omschreven door Hoefnagel (2016). Naar aanleiding van dit effect is het daarom gunstiger gedistilleerd en pH neutraal water te gebruiken. In de testopstelling wordt een buiten- en binnenklimaat gesimuleerd, waaruit geconcludeerd kan worden dat corrosieklasse C2 van toepassing is binnen dit onderzoek.

4.2. Aansluiting elementen

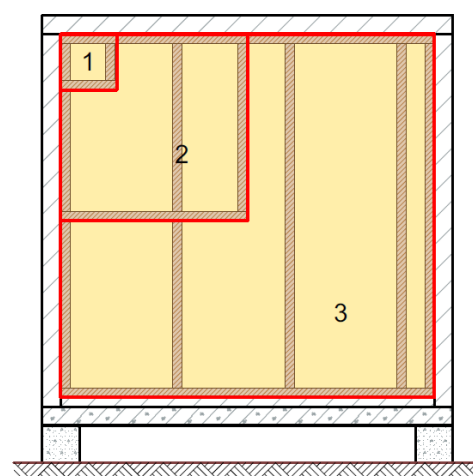
Naar aanleiding van Tabel 1 en de informatie afkomstige van A. Krimpenfort dient de testopstelling damp- en luchtdicht uitgevoerd te worden. Dit houdt in dat niet alleen de wand- en plafondafwerking in het juiste materiaal uitgevoerd dient te worden, maar ook de naden tussen deze elementen. Om het luchtdicht uit te voeren kunnen deze naden dichtgemaakt worden gelaste naden of kit. Gelaste naden zijn tevens ook dampdicht en daarom beter dan kitnaden. Vanwege gebrek aan deskundigheid en tijd is het aanbevolen om deze detaillering nader te bespreken met een deskundige op het gebied van het realiseren van klimaatkamers.

4.3. Afmetingen testmonster

Deelrapport; meetmethode en (meet)apparatuur omschrijft de werking van randeffecten en de gevolgen hiervan. Dit principe heeft een invloed gehad op het ontwerp van de testopstelling, waarbij het testmonster (gevel) overgedimensioneerd is in oppervlakte om deze randeffecten uit te sluiten ten opzichte van de sensor-waarnemingen. Ook dient het testmonster een zodanige oppervlakte te hebben dat er betrouwbare metingen gedaan kunnen worden. Dit heeft te maken met de grootte en invloed van bouwelementen. Indien een testmonster opgebouwd is uit bijvoorbeeld een houtskeletbouw (HSB) binnenspouwblad, betekent dit dat het geen homogene laag betreft. Op de plekken van de houten stijlen & regels zal het vochttransport zich anders gedragen dan door het isolatiemateriaal. Figuur 2 geeft een doorsnede weer van een HSB wand als testmonster. Hierin zijn drie zones gemarkeerd als voorbeeld om aan te tonen tot in hoeverre de houten stijlen en regels invloed hebben op het oppervlak. Hierbij is rekening gehouden met het feit dat er altijd een onder- & bovenregel en zijstijlen aanwezig zijn. Deze worden in alleen voor de desbetreffende zone meegerekend. Tabel 3 toont aan dat des te groter het oppervlak van de HSB wand wordt, het percentage hout oppervlakte afneemt en het oppervlakte voor isolatie toeneemt. De afmetingen van de elementen behouden hierbij hun afmetingen, omdat deze in de praktijk zo worden toegepast. Omdat in deze testopstelling een deel van zo'n gevel wordt getest is het wel van belang onrealistische effecten uit te sluiten.

Zone	Opp. Hout	Opp. Isolatie	Opp. Totaal
1	55,6 %	44,4 %	0,09 m
2	23 %	77 %	1,00 m
3	16,7 %	83,3 %	3,90 m

Tabel 3: verhouding hout/isolatie in HSB wand

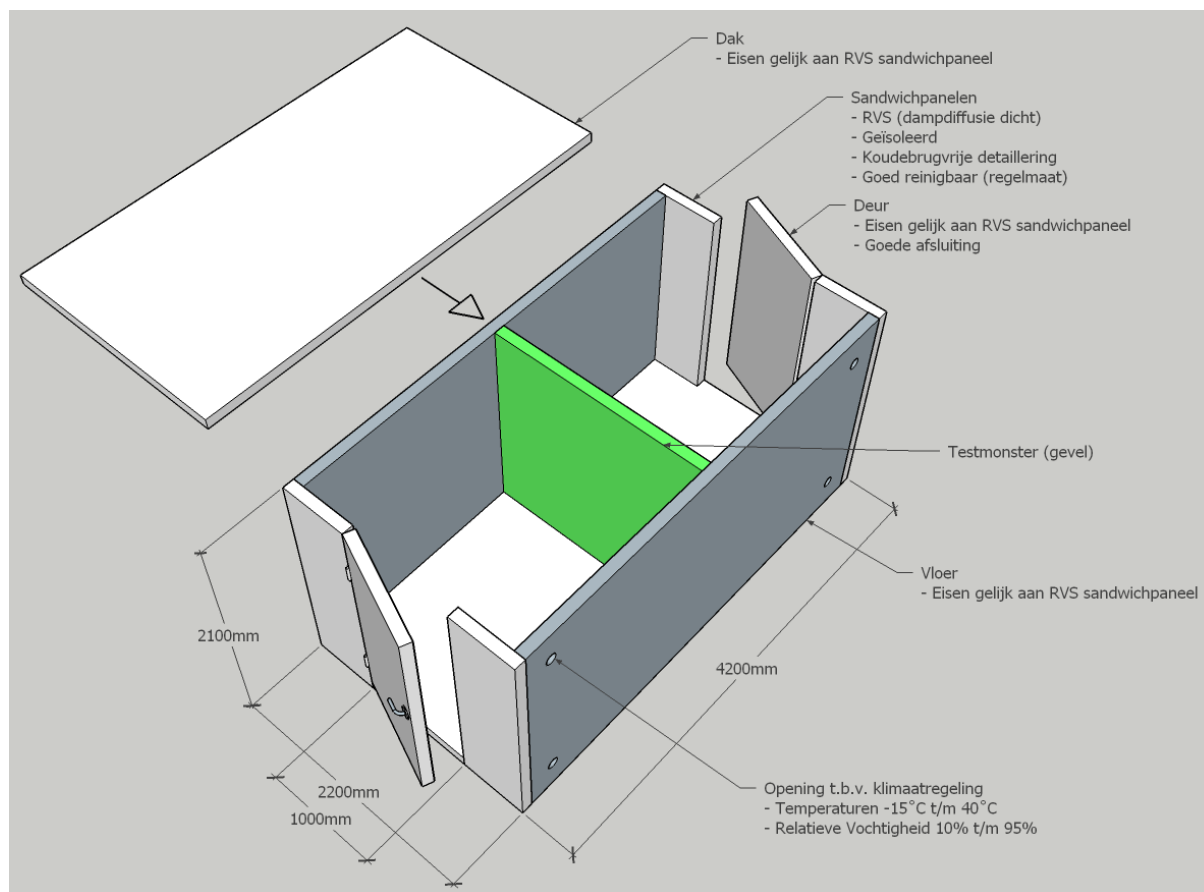


Figuur 2: doorsnede houtskeletbouw testmonster t.b.v. voorbeeld

De testopstelling dient 'inloopbaar' te zijn. Dit is gunstig indien het testmonster gecontroleerd of aangepast dient te worden nadat deze in de testopstelling geïnstalleerd is. Vanaf circa 2 m hoogte en 0,9 m breedte is deze al 'inloopbaar'. Echter kunnen er alsnog valse metingen worden gedaan vanwege de smalle breedte en is het verstandig de breedte ongeveer gelijk te houden aan de hoogte. Daarbij kom je aan een minimaal doorsnede afmeting van 2 × 2 meter. Naar aanleiding van het contact met deskundigen over klimaatkamers is schetsconcept 2 ontworpen (zie Figuur 3).

4.4. Realisatie mogelijkheden

Het schetsontwerp is besproken met meerdere installatiebedrijven, waarbij dhr. H. Punte (Colpro B.V.) beweert de testopstelling de kunnen realiseren zoals is weergegeven in Figuur 3. Wel had dhr. H. Punte (2017) een opmerking die leidde tot een randvoorwaarden, waarbij de testopstelling 'los' van de vloer gerealiseerd diende te worden om warmteoverdracht met de onderliggende vloer zoveel mogelijk te voorkomen. In Figuur 2 is dit principe overigens terug te zien. Met behulp van een transmissieberekening kan de dikte van de isolatie bepaald worden. Dit wordt veelal uitgevoerd door het installatiebedrijf en is tevens afhankelijk van de toegepaste verwarmings- en koelingsapparatuur.



Figuur 3: schetsconcept testopstelling nummer 2

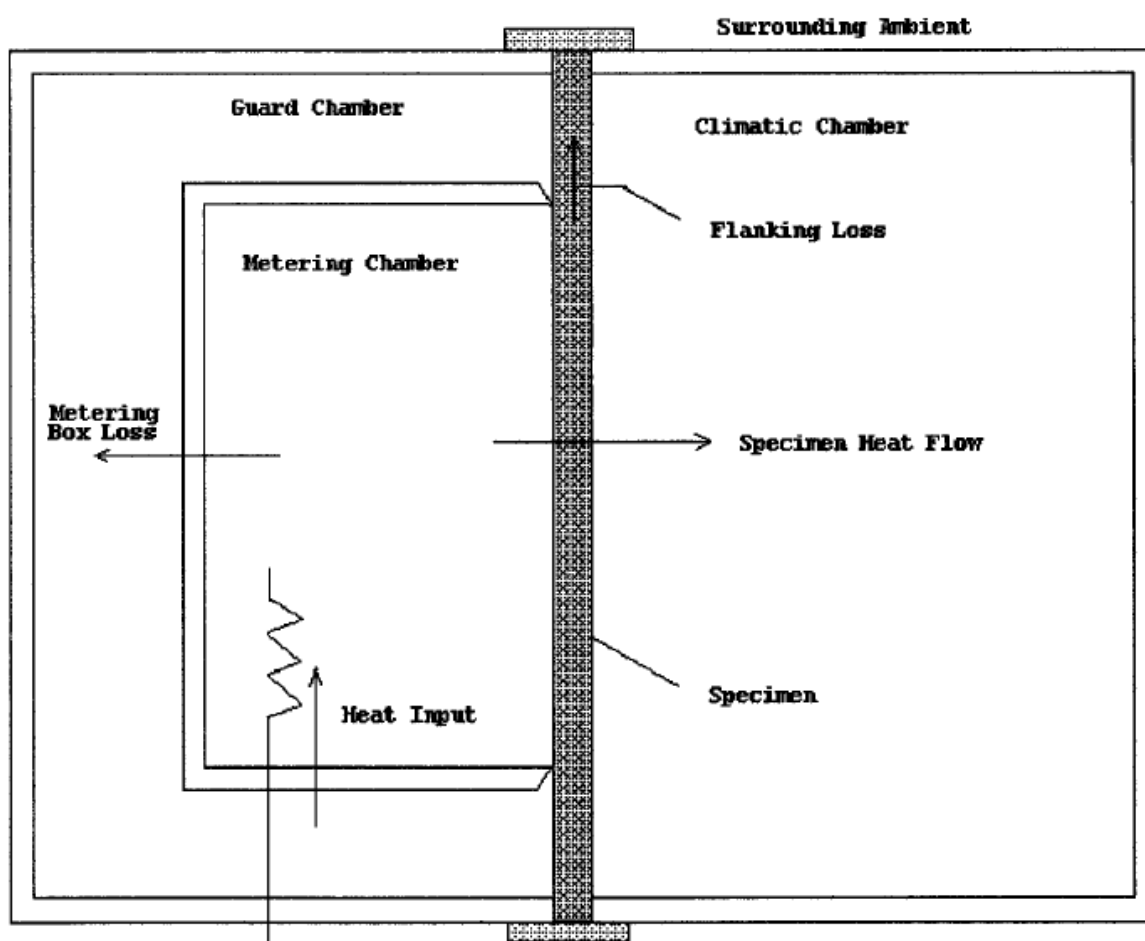
Dhr. A. Liefbroer, werkende bij Klima-testtechniek (2017), beweert echter dat de testopstelling in Figuur 3 al bestaat. Deze wordt gebouwd onder de naam Hot Box testopstelling en dat zij deze wel eens gebouwd hebben. Tevens heeft dhr. A. Liefbroer een prijsindicatie gegeven voor het bouwen van deze testopstelling. De minimale kosten bedroegen circa €120.000,- tot en met €150.000,- en konden oplopen tot en met €300.000,- tot en met €400.000,-. Hoofdstuk 5 gaat dieper in op wat de Hot Box testopstelling inhoudt.

5. Hot Box methode

Paragraaf 4.4. beschrijft dat naar aanleiding van het contact met dhr. A. Liefbroer, een testopstelling bestaat die lijkt op het tweede schetsconcept weergegeven in Figuur 3. De informatie over het bestaan van de Hot Box is tegen het einde van dit onderzoek naar voren gekomen. Dit houdt in dat deze informatie niet meer volledig kan worden onderzocht. Er is wel nader gekeken naar wat de Hot Box methode inhoudt en daaruit is gebleken dat de Hot Box methode nagenoeg dezelfde opbouw heeft als het tweede schetsconcept in Figuur 3. De 'Hot Box method' staat omschreven in ASTM Standard C1363 (1997). De bron gebruikt voor deze informatie is de ASTM C1363-97, omdat deze bron volledig beschikbaar is. Momenteel is er een versie die opgesteld is in 2011 en deze bevat verschillen met die uit 1997, echter het principe van de testopstelling is hetzelfde. Deze betreft alleen de werkwijze die gehandhaafd dient te worden op het gebied van thermische prestaties. Er bestaan meerdere soorten Hot Box methoden, die in verschillende grootten worden gebouwd. Twee van al deze methoden worden het meest gebruikt. Dit zijn de 'Guarded Hot Box' methode en de 'Calibrated Hot Box' methode.

5.1. Guarded Hot Box methode

De Guarded Hot Box is ook wel de klassieke methode en deze is schematisch opgebouwd zoals weergegeven in Figuur 4. De Guarded Hot Box bestaat uit 2 klimaatkamers waarvan de eerste een 'Hot box' is en de andere een zogenaamde 'Cold box'. De 'Metering Chamber' is beschermd door een zogenaamde 'Guarded Chamber'. In deelrapport; meetmethode & (meet)apparatuur is beschreven dat randeffecten opdoen in de testopstelling en dat er daarom een gespecificeerd sensorgebied aanwezig dient te zijn om betrouwbare metingen te kunnen doen. In de Hot Box methode is de de 'Flanking Loss'. Het sensorgebied is geplaatst in het midden van het testmonster (specimen) om de randeffecten uit te sluiten en dit principe is overeenkomstig met de 'Guarded Chamber'. De verwarmings- en koelingsproces gebeurt in de Metering Box, waar ook de metingen worden gedaan.



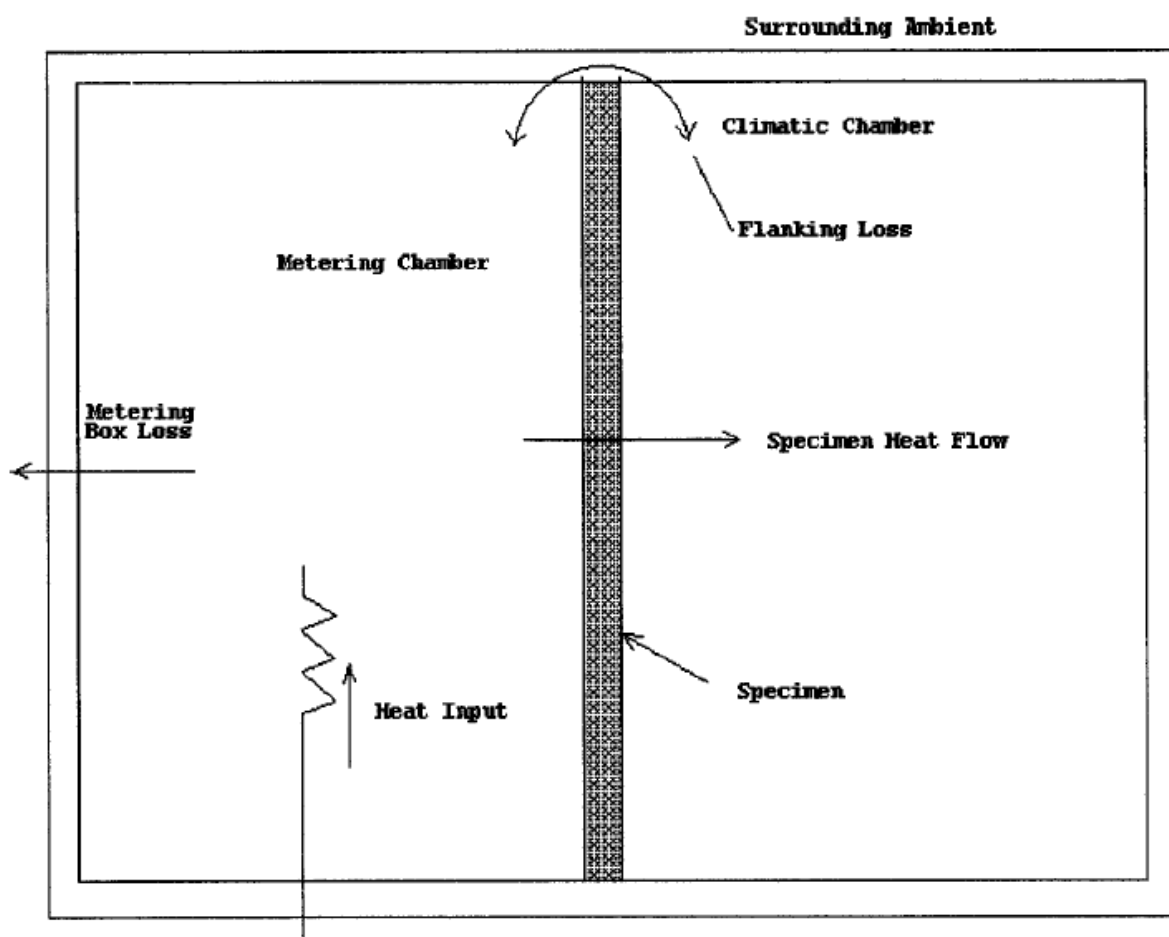
Figuur 4: schematisch opbouw Guarded Hot Box methode volgens C1363 (ASTM Standards, 1997).

5.2. Calibrated Hot Box methode

De Calibrated Hot Box methode heeft dezelfde opbouw die dat van de Guarded Hot Box, maar maakt geen gebruik van een individuele 'Metering Box' en 'Guarded Chamber'. In deze methode is dit één box. Wel heeft deze testopstelling ook twee klimaatkamers, waarbij er één de Hot Box betreft en de andere een 'Cold Box'. De Guarded Hot Box in [paragraaf 5.1](#), dient als een isolatiekamer om de temperatuur in de Metering

Box beter te kunnen controleren. In de Calibrated Hot Box worden de Metering Box en de Guarded Box in één box gestopt. Deze ruimte dient daarom ook zodanig geïsoleerd te zijn dat de thermische weerstand van de testopstelling voldoende is om betrouwbare metingen te kunnen uitvoeren. Figuur 5 geeft de schematische opbouw weer van de Calibrated Hot Box waarbij ook is te zien dat 'Flanking Loss' optreedt in de testopstelling. Dit geldt overigens ook voor de Guarded Hot Box. De Calibrated Hot Box lijkt erg op het tweede schetsconcept dat is weergegeven in Figuur 3. In de ASTM C1363 wordt vooral gesproken over het meten van de thermische prestaties van materialen. ASTM C976 is een norm die specifiek ingaat op de Calibrated Hot Box.

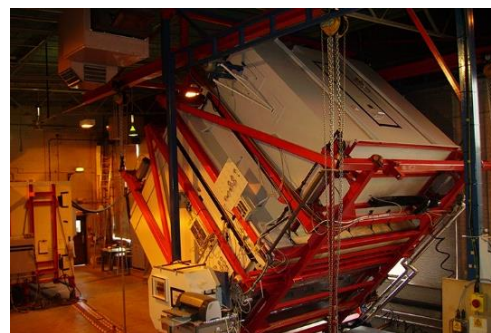
In dit onderzoek is het van belang dat het vochttransport in beeld gebracht wordt. Ook geeft de ASTM C1363 aan dat het mogelijk is de testopstelling zodanig te maken dat deze ook het vochttransport monitort binnen dezelfde opstelling. Ook wordt aangegeven dat de warmteoverdracht kan veranderen, indien er bijvoorbeeld dampdiffusie of inwendige condensatie optreedt. Vanwege beperkte kennis en ervaring wordt dit in de ASTM C1363 niet meegenomen. Wel kan geconcludeerd worden dat deze testopstelling gebruikt kan worden, echter dienen er de nodige aanpassingen te worden gedaan om het vochttransport te kunnen meten.



Figuur 5: schematische opbouw Calibrated Hot Box methode volgens C1363 (ASTM Standards, 1997).

5.3. Bestaande Hot Box testopstellingen

Het BBA (British Board of Agrément) beschikt over twee Guarded Hot Box testopstellingen waarmee zij energie efficiëntie en thermische prestaties testen. Guarded Hot Box 1 is ontworpen om zowel homogene als complexe systemen te testen. Deze testopstelling kan worden gekanteld van 0° tot en met 90° om zo daken te simuleren (zie Figuur 6). Guarded Hot Box 2 kan niet worden gekanteld, maar deze testopstelling wordt gebruikt voor volledig opgebouwde gevelconstructies. Het is hierbij aanbevolen voor de opdrachtgever contact op te nemen met het BBA om informatie te vergen.



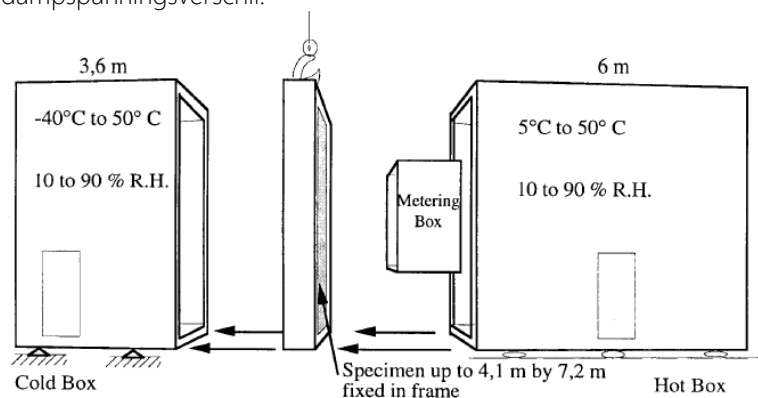
Figuur 6: Guarded Hot Box 1 at BBA

Uit de presentatie over 'Hygrothermische prestatie van strobalenbouw in Belgische klimaatcondities' door J. Langemans is gebleken dat het KU Leuven beschikt over een Hot box testopstelling (Langemans, 2014). Hierbij is het dan ook aanbevolen contact op te nemen met het KU Leuven. Deze aanbeveling komt voort, wetende dat de opdrachtgever eerder contact heeft gehad met het KU Leuven.

Het rapport; Use of an environmental chamber to investigate large-scale envelope specimen hygrothermal performance (Derome, Fazio, Anthientis, & Rao) geeft resultaten weer naar aanleiding van testen die zijn uitgevoerd met een Guarded Hot Box zoals weergegeven in Figuur 7 (zie [paragraaf 5.1](#)). Dit rapport beschrijft dat vochttransport de moeilijkste parameter is om te meten vergeleken bij warmteoverdracht en luchtstromen. In deze opstelling zijn sensoren geplaatst op drie locaties:

- Direct in de isolatie. Met relatieve vochtigheid sensoren.
- Indirect in hygroscopisch materialen zoals hout. Met vochtgehalte sensoren.
- Het nemen van monsters en deze vervolgens te wegen, te drogen en nogmaals te wegen om het vochtgehalte te meten (zie hoofdstuk 2 van deelrapport; meetmethodes en (meet)apparatuur).

In dit rapport wordt beweerd dat de verschillende methoden alle drie hun nadelen hebben. De belangrijkste daarvan is de representativiteit van de metingen. Het is onrealistisch om van uniforme metingen uit te gaan in zulke complexe samengestelde constructies. Er kan hierbij geconcludeerd worden dat het wel mogelijk is om vochttransport te meten deze testopstelling. Echter is het lastig om betrouwbare metingen uit te voeren vanwege de complexiteit van vochttransport. In het rapport van Derome, Fazio, Anthientis, & Rao worden de vochttransport wel meegenomen puur gebaseerd op dampdiffusie als gevolg van dampspanningsverschil.

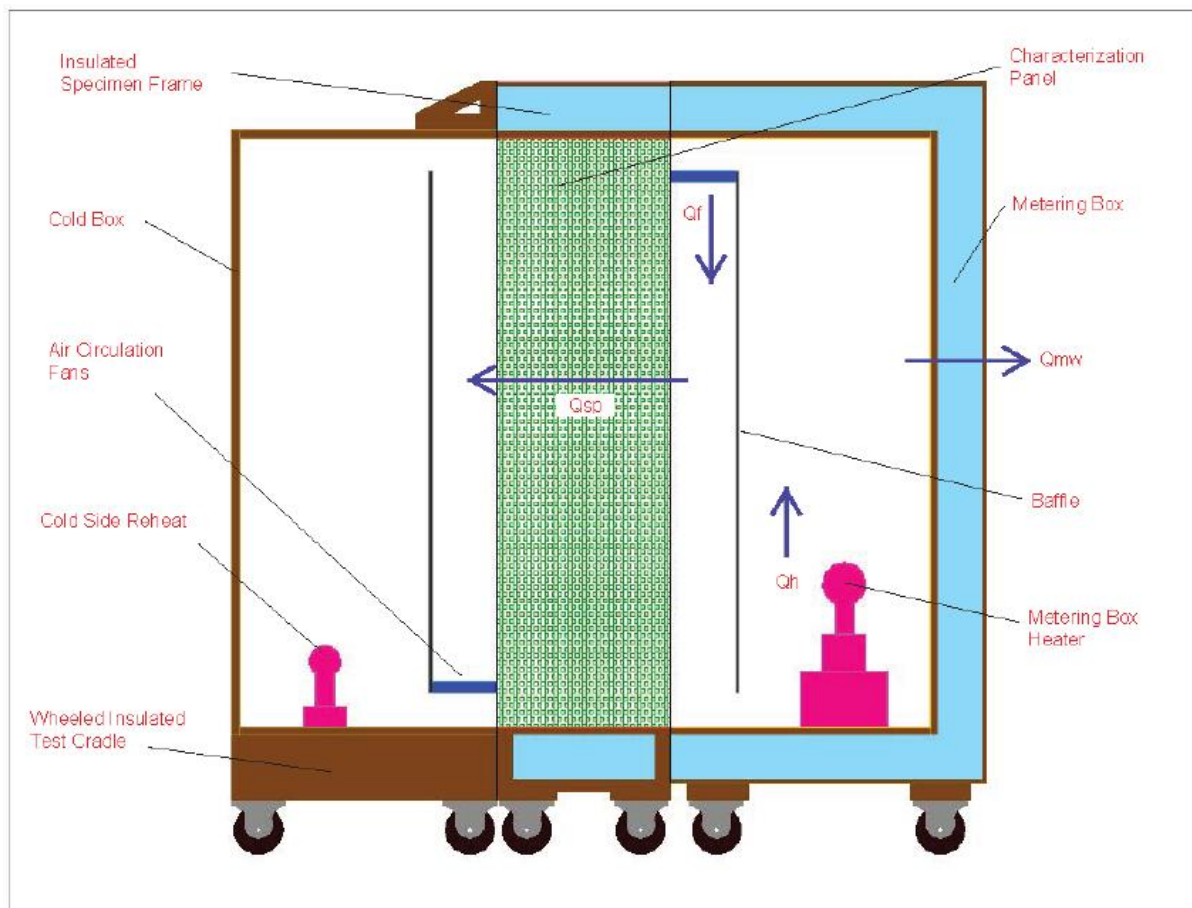


Figuur 7: Guarded Hot Box (Derome, Fazio, Anthientis, & Rao).

5.4. Een betaalbare Hot Box testopstelling

Het rapport; 'Design of an Affordable Hot Box Testing Apparatus' van S. Seitz en C. MacDougall omschrijft hoe een Hot Box testopstelling is ontworpen die goedkoper kleinschalige testen kan uitvoeren, voor non-conventionele (bouw)panelen, dan veel bestaande Hot Box testopstellingen dat kunnen. Zij beschrijven dat de kosten voor een individuele test in een geaccrediteerd laboratorium kan verschillen tussen de \$6.000 en \$20.000. Veel laboratoria hebben een wachtlijst van een aantal maanden en voor kleinere bedrijven, die maar betrokken zijn bij een paar bouwwerken per jaar, is dit in combinatie met de kosten niet betaalbaar. Seitz en MacDougall beschrijven dat er een budget beschikbaar was van circa \$30.000 voor dit ontwerp. Voor commerciële Hot Box testopstellingen dit kan deze oplopen tot \$1.000.000. De prijs is afhankelijk van de grootte, soorten (meet)apparatuur, materiaalsoort en kwaliteit van de testopstelling.

Deze testopstelling is gebaseerd op een Calibrated Hot Box methode. Figuur 8 geeft een schematische opbouw weer van de Calibrated Hot Box testopstelling. Zoals hierin te zien is, is de Cold Box niet geïsoleerd en wordt deze ruimte gekoeld door een bestaande klimaatkamer die aanwezig is op het 'Queen's Structural Engineering Laboratory'. Na berekening is bepaald dat de afmetingen voor de EPS isolatie en wandbekleding voor de Hot Box en de elementen rondom het testmonster optimaal waren bij een afmeting van 1.18m bij 1.37m met een dikte van 0.41m.



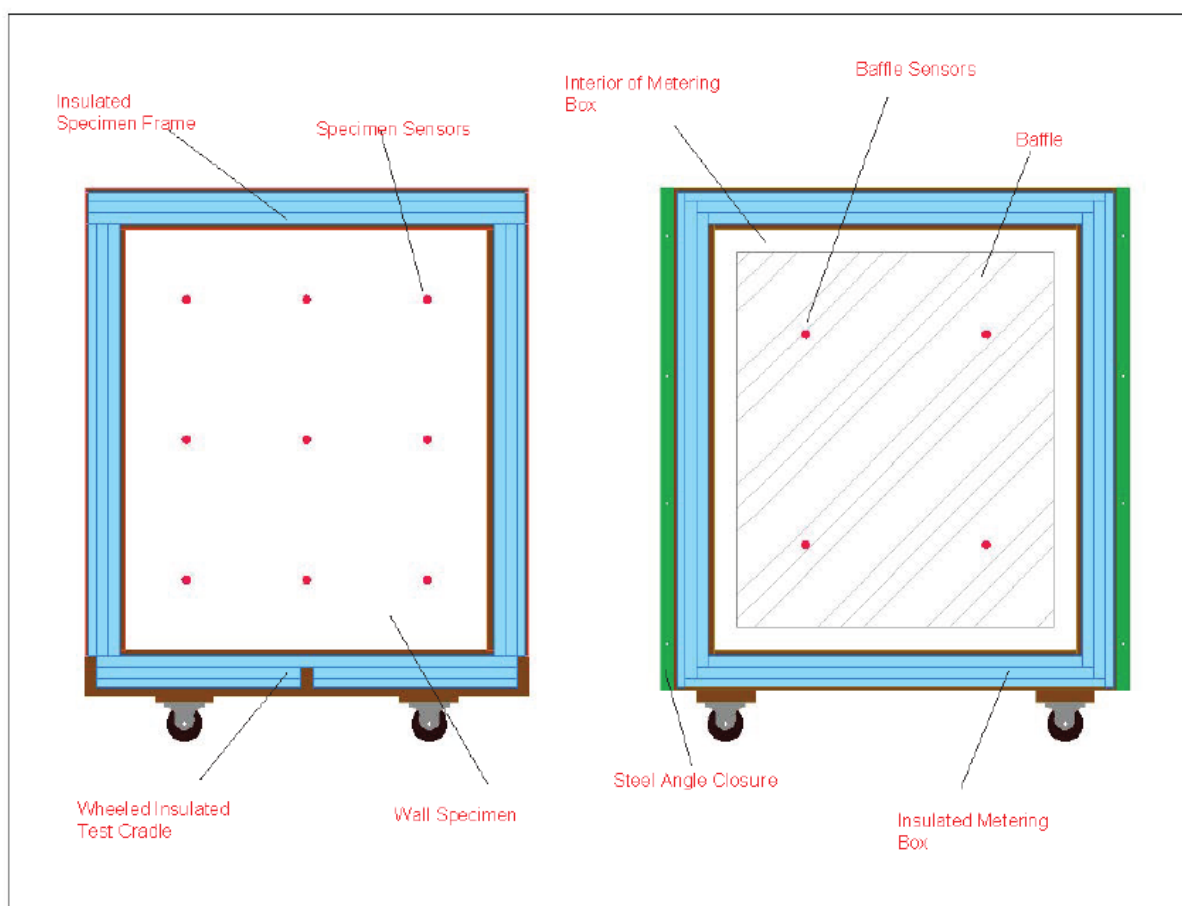
Figuur 8: schematische opbouw van Calibrated Hot Box testopstelling, bron data; (Seitz & MacDougall).

De opbouw van de Hot Box die is weergegeven in Figuur 9 is, van binnen naar buiten, als volgt:

- o 1x Multiplex 19 mm
- o 2x EPS 38,1 mm (Isolatie)
- o 1x EPS 25,4mm (Isolatie)
- o 1x Populier Multiplex 12,7 mm (uitwendige bescherming)

De lagen zijn aan elkaar gemonteerd door middel van Gorilla lijm. Alle aansluitingen zijn vervolgens afgedicht door middel van kit en tape om luchtlekken te voorkomen. De testopstelling is zodanig ontworpen dat voor het oppervlak van het testmonster een scherm van 0,15 m geplaatst kan worden om luchtcirculatie te controleren (zie Figuur 8). Ook is in de Cold Box een laag-wattage gloeilamp toegepast om de ruimte te kunnen opwarmen. Ook is de testopstelling op wielen geplaatst om deze verrijdbaar te maken, maar ook om warmteverlies aan de ondergrond tegen te gaan.

ASTM C1363 schrijft thermokoppels voor gemaakt van 30AWG draad. Seitz en MacDougall beschrijven dat deze te fijn waren om effectief te installeren. Zij hebben daarom gekozen om 4,75 m lange Type T 24AWG te gebruiken. Hierbij meten zijn wel alleen de oppervlakte temperatuur van de testmonsters.



Figuur 9: doorsnede testmonster en interieur van Hot Box testopstelling, bron data; (Seitz & MacDougall).

Tabel 4 toont een overzicht van de totale kosten van de testopstelling die door Seitz en MacDougall is ontworpen. Deze kosten zijn nagenoeg gelijk met de kosten van een volledige test die uitgevoerd wordt door een geaccrediteerd laboratorium. De kosten voor de klimaatkamer en koelingsapparatuur voor de Cold Box zijn niet meegenomen, omdat Seitz en MacDougall ervan uitgaan dat vele universitaire laboratoria

beschikken over deze installatie. De kosten voor het hanteren van de verwarmings- en koelingsapparatuur is ook niet meegenomen omdat deze sterk afhankelijk is van de soort apparatuur, kwaliteit van de isolatie in klimaatkamers en de tijd die nodig is om een nulpunt te vinden voordat er getest kan worden (zie deelrapport; dampdiffusie open bouwen, paragraaf 4.1.). De kosten voor de gehele testopstelling is dus hoger dan in Tabel 4 is weergegeven.

Item	Costs
Building Materials	\$2,025
Hardware	\$1,420
Sensors, Controls & Electronics	\$2,810
Data Acquisition & Equipment	\$2,880
SUBTOTAL:	\$9,135
Design, Fabrication & Commissioning:	\$28,000
TOTAL:	\$37,135

Tabel 4: totale kosten van testopstelling

De testopstelling die door Seitz en MacDougall is ontworpen betreft alleen het testen van de thermische prestaties en betreft hier geen vocht bij, dat wel cruciaal is bij het testen van dampdiffusie open gevelconstructies. Tevens het gebruik van Multiplex aan de binnenzijde van de testopstelling betekent dat er geen mogelijkheid is om dampdiffusie door het testmonster te meten, omdat multiplex niet dampdicht genoeg is. Ook dienen naast de thermosensoren, hygrosensoren geplaatst te worden om de vochtigheden te kunnen meten. Het scherm van 0,15 m voor de controle op luchtcirculatie is discutabel, omdat deze mogelijk een vochttransport kan belemmeren. Het is aanbevolen een oplossing te zoeken die dit scherm kan uitsluiten. Ook wordt in de Cold Box geen isolatie toegepast dat in een testopstelling voor het testen van dampdiffusie open gevelconstructies wel gewenst is, omdat er voor een buitenklimaat tot temperaturen onder het vriespunt worden gesimuleerd. Dit is niet mogelijk zonder isolatie. Ook dient zowel de Hot Box als Cold Box een aparte klimaatinstallatie te bevatten, vanwege de gevarieerde klimaten die gesimuleerd dient te worden. Concluderend kan worden gesteld dat het ontwerp van Seitz en MacDougall aanzienlijk goedkoper is dan een commerciële testopstelling. Echter wordt deze testopstelling uitsluitend gebruikt voor het testen van thermische prestaties. Om testen voor dampdiffusie open gevelconstructies uit te kunnen voeren dienen de hiervoor genoemde aanpassingen uitgevoerd te worden. Er is beweerd dat deze testopstelling voldoet aan de minimale eisen afkomstig uit de ASTM C1363. Echter vanwege gebrek aan kennis over de C1363 en praktijk ervaring met de testopstelling zal dit nader onderzocht moeten worden. Indien deze testopstelling voldoet aan de minimale eisen van het de ASTM C1363, kan dit ontwerp als referentie worden genomen.

In overleg met de opdrachtgever is geconstateerd dat de kosten van €150.000 tot en met €1.000.000 niet haalbaar is. Het is hierbij dus aanbevolen om nader te kijken naar de testopstelling ontworpen door Seitz en MacDougall. Inclusief de aanpassingen zijn de kosten van deze opstelling geschat op €50.000. Deze kosten zijn in overleg met de opdrachtgever bespreekbaar.

5.5. Nederlandse normen

Buitenom de ASTM C1363 zijn er ook Nederlandse normen die de Hot Box, oftewel de warmtekast methode behandelen. Deze normen zijn weergegeven in paragraaf 2.1.4. van deelrapport; wet- & regelgeving en normen. De 'NEN-EN 1934:1998 en' is hierbij het meest geschikt om de warmtekast mee te realiseren.

6. Conclusie

De testopstelling dient te voldoen aan de randvoorwaarden gesteld in de tabel hieronder. Deze zijn afkomstig uit deelonderzoek; dampdiffusie open bouwen.

- Twee gekoppelde klimaatruimtes.
- Testmonster (gevel) tussen klimaatruimtes.
- Elke klimaatruimte een eigen klimaatregeling.
- Klimaatregeling monitoren en regelen op; temperatuur, relatieve vochtigheid en dampspanning.
- Klimaatkamers dampdicht uitvoeren.
- Klimaatkamers luchtdicht uitvoeren.
- Klimaatkamers geïsoleerd uitvoeren.
- Aansluitingen koudebrug vrij uitvoeren.
- Temperatuur van 15°C tot 40°C.
- Relatieve vochtigheid van 10% tot 95%.
- Simulatie dient uitgevoerd te worden op basis van een 'seizoen-cyclus' (1 jaar). Dit betekent niet dat de tijdperiode van de test een jaar dient te bedragen.

Het eerste schetsconcept heeft het principe bepaald voor de opbouw van de testopstelling. Deze is gebaseerd op de randvoorwaarden uit de tabel hierboven (zie Figuur 1).

Het tweede schetsconcept gaat verder in op details naar aanleiding van het eerste schetsconcept en contact met deskundigen. Daarbij is het van belang dat de testopstelling voldoet aan de volgende randvoorwaarden.

- Afwerking elementen is uitgevoerd in minimaal RVS-304 of RVS-316 in verband met dampdicht zijn.
- Afwerking elementen is glad in verband met reinigbaarheid.
- Afwerking van wanden, plafond en vloer is bestendig tegen corrosie als gevolg van hoge relatieve vochtigheden. Dit kan eventueel opgelost worden door middel van een coating zoals weergegeven in Tabel 2. Corrosieklasse C2 is voldoende met betrekking tot dit onderzoek.
- Bij voorkeur worden gelaste naden aanbevolen. Indien niet mogelijk zijn kitnaden een mogelijkheid.
- Testopstelling dient 'inloopbaar' te zijn.
- Testmonster dient relatief groot van oppervlak te zijn om een realistische representatieve waarden uit de metingen te kunnen waarnemen. In verband met de inloopbaarheid en uniformiteit van de metingen dient het testmonster een oppervlakte te hebben van minimaal 2 × 2 m.
- Testopstelling dient los van de vloer te staan om warmteoverdracht met de onderliggende vloer te minimaliseren.

Door deskundigen zijn de hierop volgende punten benadrukt als aandachtspunt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de randvoorwaarden uit deelonderzoek; dampdiffusie open bouwen ook nagestreefd wordt in de praktijk. Tevens dienen deze randvoorwaarden te worden nagestreefd om betrouwbare metingen te kunnen uitvoeren.

- Wand van de testopstelling dampdicht uitvoeren.
- De testopstelling luchtdicht uitvoeren.
- De testopstelling geïsoleerd uitvoeren.
- Aansluiting is cruciaal en dient koudebrugvrij te zijn.

Tegen het einde van dit onderzoek is informatie naar voren gekomen over het bestaan van de Hot Box methode. Dit is een meetmethode in een testopstelling waarbij voornamelijk de thermische prestaties in beeld worden gebracht en de norm hiervoor wordt omschreven in ASTM C1363. Zoals vermeldt in deelrapport; meetmethode en (meet)apparatuur hebben temperatuur en vocht een sterke relatie. Echter worden in veel rapport over de Hot Box methode alleen de thermische prestatie gemeten. Sommige rapporten melden het effect van vochttransport, maar voeren hun testen zodanig uit dat dit nagenoeg uitgesloten kan worden. Er bestaan twee principes van Hot Box Methode; de Guarded Hot Box methode en de Calibrated Hot Box methode. In beide opstelling wordt gesproken van 'flanking loss' en dit is overeenkomstig met de randeffecten, wat is omschreven in deelrapport; meetmethoden & (meet)apparatuur). De Calibrated Hot Box heeft de meeste overeenkomsten met het tweede schetsconcept. Echter wordt in de ASTM C1363 geen vochttransport meegenomen vanwege gebrek aan kennis en ervaring. Voor dit onderzoek is het van belang dat het vochttransport in beeld wordt gebracht. Concluderend kan worden gesteld dat de Calibrated Hot Box methode de juiste methode is om de gewenste testen in uit te kunnen voeren. Wel dienen hierbij aanpassingen gedaan te worden om de testopstelling te laten voldoen aan de eerder genoemde randvoorwaarden.

Het Britisch Board of Agrément en het KU Leuven beschikken over een Hot Box testopstelling. Het is daarom ook aanbevolen dat de opdrachtgever contactopneemt met deze instanties. Tevens is het aanbevolen om eventuele andere bedrijven te contacteren met een Hot Box testopstelling om informatie hierover te verkrijgen.

Naar aanleiding van een rapport kan worden geconcludeerd dat het mogelijk is vocht(gehalte)sensoren te plaatsen in het testmonster. Deze vocht(gehalte)sensoren kunnen op drie verschillende locaties worden geplaatst die hieronder zijn weergegeven. Wel is het discutabel of de metingen uit deze sensoren accuraat en betrouwbaar zijn, omdat vochttransport erg complex is.

- Direct in de isolatie. Met relatieve vochtigheid sensoren.
- Indirect in hygroscopisch materialen zoals hout. Met vochtgehalte sensoren.
- Het nemen van monsters en deze vervolgens te wegen, te drogen en nogmaals te wegen om het vochtgehalte te meten (zie hoofdstuk 2 van deelrapport; meetmethodes en (meet)apparatuur).

De kosten van een Hot Box kan oplopen van €150.000 tot en met €1.000.000. en is afhankelijk van de grootte, soorten (meet)apparatuur, materiaalsoort en kwaliteit van de testopstelling. Naar aanleiding van deze prijzen is er een betaalbare Calibrated Hot Box testopstelling ontwikkeld met een kostenprijs van circa \$37.000. Deze testopstelling is aanzienlijk kleiner, maar zou alsnog moeten voldoen aan de minimale eisen die gesteld zijn in de ASTM C1363. Deze bewering dient nader onderzocht te worden voordat de testopstelling als referentie gebruikt kan worden.

In overleg met de opdrachtgever is geconstateerd dat de kosten van €150.000 tot en met €1.000.000 niet haalbaar is. Het is hierbij dus aanbevolen om nader te kijken naar de testopstelling ontworpen door Seitz en MacDougall. Inclusief de aanpassingen zijn de kosten van deze opstelling geschat op €50.000. Deze kosten zijn in overleg met de opdrachtgever bespreekbaar.

De Nederlandse equivalent van de ASTM C1363 is de 'NEN-EN 1934:1997 en'. Deze omschrijft waaraan de Hot Box, oftewel de warmtekast aan dient te voldoen tijdens de realisatie.

7. Literatuurlijst

ASTM Standards. (1997). *C1363*. West Conshohocken: ASTM Standards.

British Board of Agrément. (sd). *Energy Efficiency and Thermal Performance*. Opgehaald van BBA Certs:
<http://www.bbacerts.co.uk/test-services/test-areas/energy-efficiency-and-thermal-performance/>

Derome, D., Fazio, P., Anthientis, A., & Rao, J. (sd). *Use of an environmental chamber to investigate large-scale envelope specimen hygrothermal performance*. Montreal: Concordia University.

Hoefnagel, L. (2016, Februari 8). *Welke materiaalkeuze: RVS 304 of RVS 316?* Opgehaald van HEGO:
<http://hego.nl/welke-materiaalkeuze-rvs-304-of-rvs-316/>

Isocab nv. (2013, 9). Selectie- en onderhoudsgids voor coatings. Bavikhove, België.

Krimpenfort, A. (2017, April 10). Klimaatkamer dampdiffusie. (Y. Verhoeven, Interviewer)

Kuindersma, P. (2017, Februari 27). Bouwfysica dampdiffusie open bouwen. (Y. Verhoeven, Interviewer)

Langemans, J. (2014, November). Hygrothermische prestatie van strobalebouw in Belgische klimaatcondities. Brussel, België.

Liefbroer, A. (2017, Mei 15). Realisatie klimaatkamer. (Y. Verhoeven, Interviewer)

Punte, H. (2017, Mei 2). Realisatie klimaarkamer. (Y. Verhoeven, Interviewer)

Remans, D. (2017, April 3). Klimaatkamer dampdiffusie. (Y. Verhoeven, Interviewer)

Seitz, S., & MacDougall, C. (sd). *Design of an Affordable Hot Box Testing Apparatus*. Kingston: Queen's University.